

# **Analyse und Erweiterung von bestehenden Prognosemodellen zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der  
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Ing. Aner Martinez Soto

geboren am 03.07.1983 in Nueva Tolten, Chile

Weimar, den 07.10.2016



---

Kerstin Schönherr gewidmet.





## Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Mark Jentsch für die wissenschaftliche Betreuung der vorliegenden Arbeit. Seine vielfältigen kritischen Anmerkungen und unsere zahlreichen fachlichen Diskussionen haben dazu beigetragen, dass ich meine Arbeit auf einem hohen Niveau fertigstellen konnte.

Marlene Küllmer, Marisol Quezada, Osvaldo Frindt und Bernhard Blaschke standen mir beim Start dieses Projekts zur Verfügung und haben dazu beigetragen, dass ich vertrauensvoll die Herausforderungen einer Doktorarbeit meistern konnte. Für alle wertvollen Empfehlungen, die sie mir gegeben haben, bedanke ich mich recht herzlich.

Des Weiteren möchte ich mich bei Rebecca Stüken, Heike Kupfer, Laura Günther und Maria Günther bedanken, die mir bei der sprachlich treffenden Formulierung des Inhalts meiner Texte geholfen haben. Für die wertvolle Zeit, die wir dabei gemeinsam verbracht haben, und ihre freundliche Unterstützung möchte ich mich ganz herzlich bedanken.

Ebenfalls ein großer Dank für den fachlichen Austausch gilt den Mitarbeitern des *Lehrstuhls Bauphysik* und des *Bauhaus-Instituts für zukunftsweisende Infrastruktursysteme der Bauhaus-Universität Weimar*. Ganz besonders hervorheben möchte ich Herrn Dr.-Ing. Richard Rudolph für das Korrekturlesen und seine wertvollen Empfehlungen. Herrn Dipl.-Ing. Roy Holzhey möchte ich sehr für seine Unterstützung bei der Lösung von Unwägbarkeiten in der LaTeX-Programmierung der Texte sowie bei technischen Problembehebungen an meinem Computer danken.

Allen Kollegen und Freunden, die mit ihren Ratschlägen zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben und nicht namentlich an dieser Stelle erwähnt werden, ebenfalls ein herzliches Dankeschön.

Der größte Dank aber gilt meiner Freundin Kerstin, die mich von Anfang an auf die vielfältigste Art und Weise unterstützt, mir nicht nur beim Erlernen der deutschen Sprache geholfen, sondern auch die deutsche Kultur näher gebracht und dadurch meine persönliche Weiterentwicklung gefördert hat.



## Zusammenfassung

Die wachsende Notwendigkeit zur Energieeinsparung hat in verschiedenen Ländern zur Entwicklung von Prognosemodellen zur Bestimmung des Energiebedarfs im Wohnungssektor geführt. Obwohl Prognosemodelle prinzipiell eine Lösung zur Bestimmung des Energiebedarfs und zur Beurteilung der Auswirkungen von zukünftigen Energieeinsparmaßnahmen darstellen, sind die bestehenden Modelle jedoch mit Unwägbarkeiten in der Modellierung und Mängeln bezüglich der verwendeten Daten und Methodik behaftet.

In dieser Arbeit werden die Übertragbarkeit, Genauigkeit und stochastische Unsicherheit von zwölf Prognosemodellen (MAED-2, FfE-Gebäudemodell, CDEM, REM, CREEM, ECCABS, REEPS, BREHOMES, LEAP, DECM, CHM, BSM) analysiert, wobei Deutschland als Fallbeispiel verwendet wird. Zur Verbesserung der Übertragbarkeit der bestehenden Modelle werden Anpassungen vorgeschlagen. Außerdem wird für jedes Modell eine Bestimmung der einflussreichsten Parameter auf den simulierten Endenergiebedarf mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse vorgenommen. Es konnte gezeigt werden, dass Modelle mit einem hohen Detaillierungsgrad nicht zwangsläufig genauere Ergebnisse für den Endenergiebedarf garantieren. Dennoch wurde festgestellt, dass Modelle mit einem niedrigen Detaillierungsgrad Ergebnisse mit größeren Unsicherheiten liefern als Modelle mit einem höheren Detaillierungsgrad. Es wurde weiterhin festgestellt, dass die einflussreichsten Parameter zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor Innentemperatur, Außentemperatur (Gradtagzahl), Bevölkerungsentwicklung und Anzahl der Gebäude/Wohnungen sind.

Auf der Grundlage der Erkenntnisse zur Bewertung bestehender Modelle und der Bestimmung der einflussreichsten Parameter wurde ein optimiertes Prognosemodell (Transferable Residential Energy Model, TREM) entwickelt. Mit dessen Hilfe wurde die Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor sowie in anderen Ländern (Vereinigtes Königreich und Chile) prognostiziert. Diese Ergebnisse wurden anschließend mit statistischen Daten verglichen. Das TREM-Modell bestimmt den Endenergiebedarf auf der Grundlage der wahrscheinlichsten Variationen der einflussreichsten Eingangsparameter mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation. Im Gegensatz zu bestehenden Modellierungsansätzen liefert das Modell damit auch einen Bereich mit Wahrscheinlichkeitsbändern für den zukünftigen Endenergiebedarf. Die Ergebnisse des TREM-Modells zeigen, dass das Modell genauere Ergebnisse liefern kann als derzeitige Modelle mit einem Mittelwert der prozentualen Differenz niedriger als 5% und einem Korrelationskoeffizienten  $r$  höher als 0,35 und darüber hinaus dazu geeignet ist, ohne Anpassungen eine Prognose der Entwicklung des zukünftigen Endenergiebedarfs im Wohnungssektor für unterschiedliche Länder zu erstellen.



## Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Zusammenfassung	V
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIX
Nomenklatur	XXI
Abkürzungsverzeichnis	XXIX
Ehrenwörtliche Erklärung	XXXIII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Zielsetzung und Herangehensweise . . . . .	3
<b>2 Energieverbrauch</b>	<b>7</b>
2.1 Globaler Energieverbrauch . . . . .	7
2.2 Energieverbrauch im Wohnungssektor . . . . .	13
2.3 Energieverbrauch im deutschen Wohnungssektor . . . . .	17
<b>3 Bestehende Modelle und benötigte Daten zur Bestimmung des     Endenergieverbrauchs bzw. zur Prognose des Endenergiebedarfs im     Wohnungssektor</b>	<b>31</b>
3.1 Unwägbarkeit bestehender Modelle zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor . . . . .	33
3.2 Klassifikationsansätze zur Einordnung bestehender Modelle . . . . .	40
3.2.1 Statistische und bauphysikalische Bottom-Up-Modelle . . . . .	41
3.2.2 Ansätze für eine detailliertere Klassifikation bestehender Modelle . . . . .	42
3.2.3 Die Rolle des Detaillierungsgrades für die Modellierung . . . . .	44
3.2.4 Modellierung von Energie-Umwelt-Interaktionen . . . . .	46
3.3 Modelleingangsparameter und benötigte Daten zur Bestimmung des aktuellen Endenergieverbrauchs und zukünftigen Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor . . . . .	47
3.3.1 Anzahl der Gebäude bzw. Wohnungen . . . . .	48
3.3.2 Spezifischer Endenergiebedarf . . . . .	53
3.3.2.1 Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme $EEB_{rw}$ . . . . .	54
3.3.2.2 Bestimmung des Endenergiebedarfs für Warmwasser $EEB_{ww}$ . . . . .	59
3.3.2.3 Bestimmung des Endenergiebedarfs für Kochen $EEB_{ko}$ , Elektrogeräte und Beleuchtung $EEB_{eb}$ . . . . .	60
3.3.3 Energiepreise und $CO_2$ -Emissionsfaktoren . . . . .	62

<b>4</b>	<b>Überprüfung bestehender Prognosemodelle auf ihre Übertragbarkeit, Genauigkeit, Sensitivität und Unsicherheit</b>	<b>63</b>
4.1	Methodik zur Überprüfung der bestehenden Modelle . . . . .	63
4.1.1	Übertragbarkeit . . . . .	63
4.1.2	Genauigkeit . . . . .	64
4.1.3	Sensitivitätsanalyse . . . . .	66
4.1.4	Unsicherheit . . . . .	67
4.2	Ergebnisse der Überprüfung der bestehenden Modelle . . . . .	72
4.2.1	Übertragbarkeit . . . . .	72
4.2.2	Genauigkeit . . . . .	75
4.2.3	Sensitivitätsanalyse . . . . .	83
4.2.4	Unsicherheit . . . . .	88
4.3	Schlussfolgerungen für die Optimierung von Prognosemodellen . . . . .	95
<b>5</b>	<b>Ansatz für ein optimiertes Modell zur Prognose des Energiebedarfs im Wohnungssektor</b>	<b>99</b>
5.1	Weiterentwicklung bestehender Modelle in ein übertragbares Prognosemodell . . . . .	99
5.1.1	Gebäudebestandsmodul . . . . .	102
5.1.2	Endenergiebedarfsmodul . . . . .	107
5.2	Überprüfung des Modells mit historischen Daten des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor . . . . .	122
5.3	Simulation zur zukünftigen Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor . . . . .	129
<b>6</b>	<b>Überprüfung der Übertragbarkeit und Genauigkeit des Prognosemodells</b>	<b>133</b>
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>147</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>153</b>
<b>A</b>	<b>Definitionen</b>	<b>179</b>
A.1	Energieverbrauch und Energiebedarf . . . . .	179
A.2	Wirkungsgrad und Nutzungsgrad . . . . .	181
A.3	Gradtagzahlen und Heizgradtage . . . . .	182
A.4	Nullenergiehaus und Passivhaus . . . . .	183
A.5	Allgemeine Begriffe . . . . .	183
A.6	Bauphysikalische Begriffe . . . . .	184
<b>B</b>	<b>Erklärungen</b>	<b>187</b>
B.1	Auswirkungen der Wärmeschutzverordnung bzw. Einsparenergieverordnung auf Neubaubauten, basierend auf: [68, 221, 288-292] . . . . .	187
<b>C</b>	<b>Abgeleitete Daten</b>	<b>189</b>
C.1	Unterteilung des Endenergieverbrauchs nach Nutzungsbereichen . . . . .	189
C.2	Entwicklung des Nutzungsgrades . . . . .	191

C.3	Unterteilung des Nutzenergieverbrauchs nach Energiequellen . . . . .	205
C.4	Entwicklung der Anzahl der Gebäude und Wohnungen in Deutschland . . .	206
C.5	Deutsche Gebäudetypologie . . . . .	207
C.6	Entwicklung des Verhältnisses der Wohnfläche pro Person in Deutschland .	208
C.7	Spezifischer Endenergieverbrauch pro Wohnung für statistische-Modelle . .	209
C.8	Energieverbrauchskennwerte nach Gebäudetyp . . . . .	210
C.9	Bevölkerungsentwicklung, Anzahl der Wohnungen, Personen pro Wohnung und Gradtagzahl nach Jahr . . . . .	211
C.10	Gebäudedaten für Simulationen mit bauphysikalischen Modellen . . . . .	212
C.11	Klimadaten für Deutschland . . . . .	213
C.12	Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland und CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren . . . . .	214
C.13	Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Eingangsparameter . . . . .	215
C.14	Gebäudeanzahl in den korrespondierenden Zeiträumen der Baualtersklasse nach Corradini et al. [16] (Gl. D-2.2) . . . . .	218
<b>D</b>	<b>Ausführliche Beschreibung der bestehenden Modelle</b>	<b>219</b>





## Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung der Forschungsschritte (durchgezogene Linien) und der Kalibrierung (gestrichelte Linien) des verbesserten Prognosemodells . . . . .	5
2.1	Langfristige Entwicklung des globalen Primärenergieverbrauchs und Prognose der IEA des zukünftigen Primärenergiebedarfs nach Energiequelle [70, 77] . . . . .	8
2.2	Vergleich der Entwicklung des langfristigen Primärenergieverbrauchs (Basisjahr 1990=100) von zwei Schwellenländern (Thailand und Chile) und zwei Industrieländern (Deutschland und UK). Statistische Daten für Thailand, Chile, Deutschland und UK: [64, 71, 90, 91] . . . . .	9
2.3	Vergleich der Energiekennzahlen von Thailand (2012), Chile, Deutschland und UK (2013). Daten zur Verteilung und Menge des Primär- und Endenergieverbrauchs abgeleitet aus Datenquellen: [64, 71, 90, 92, 93]. Der Sektor „Andere“ beinhaltet die Sektoren: Landwirtschaft, Gewerbe/Handel und Dienstleistung. Daten zum Primärenergieverbrauch pro Kopf bezogen auf Bevölkerungsdaten von 2012/2013, abgeleitet aus Datenquelle: [94] . . . . .	11
2.4	Verteilung des Endenergieverbrauchs in der Europäischen Union (EU) nach verschiedenen Sektoren (Bezugsjahr 2013, Datenquelle: [55]) . .	13
2.5	Anteil des Wohnungssektors am nationalen Endenergieverbrauch und dessen Zusammensetzung nach Nutzenergie. Datenquellen: [64, 119-129]. Anmerkungen: Bezugsjahr 2013 für UK, Deutschland, USA und Australien; 2011 für Italien und Spanien; 2010 für Kanada; 2009 für Südafrika und Frankreich und 2008 für Chile und China. In Kanada wurde „Kochen“ unter dem Begriff „Beleuchtung und Elektrogeräte“, betrachtet; für Frankreich, Deutschland, Italien und UK wurde „Gebäudekühlung“ unter dem Begriff „Beleuchtung und Elektrogeräte“ betrachtet. . . . .	14
2.6	Vergleich des durchschnittlichen Endenergieverbrauchs pro Wohnung für zwölf ausgewählte Länder. Datenquellen: Daten des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor abgeleitet aus Datenquellen: [64, 119, 120, 127, 129-131]. Daten der Anzahl der Wohnungen abgeleitet aus Datenquellen: [23, 33, 131-140]. Daten der Anzahl der Einwohner abgeleitet aus Datenquelle: [141] . . . . .	15
2.7	Vergleich des durchschnittlichen Endenergieverbrauchs pro Kopf und Wohnung. Datenquellen: Daten des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor abgeleitet aus Datenquellen: [64, 119, 120, 127, 129-131]. Daten der Anzahl der Wohnungen abgeleitet aus Datenquellen: [23, 33, 131-140]. Daten der Anzahl der Einwohner abgeleitet aus Datenquelle: [141] . . . . .	16

2.8	Verteilung des Endenergieverbrauchs in Deutschland nach verschiedenen Sektoren (Bezugsjahr 2013). Datenquelle: [64] . . . . .	18
2.9	Langfristige Entwicklung des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor nach Energiequelle. Datenquelle: [64] . . . . .	18
2.10	Verteilung des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor (Bezugsjahr 2013) nach verschiedenen Nutzungsbereichen. Datenquelle: [64] . . . . .	20
2.11	Langfristige Entwicklung des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor nach Nutzungsbereiche. Abgeleitet aus Datenquellen: [64, 147] . . . . .	20
2.12	Vergleich der Entwicklung des langfristigen Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor nach Nutzungsbereichen (Basisjahr 1990 = 100). Abgeleitet aus Datenquellen: [64, 147] . . . . .	21
2.13	Vergleich zwischen dem mittleren maximalen Endenergiebedarf für Raumwärme in Neubauten entsprechend der Wärmeschutzverordnung (WSchV) bzw. Energieeinsparverordnung (EnEV) und dem durchschnittlichen Endenergieverbrauch aller Wohngebäude in Deutschland. Abgeleitet aus Datenquellen: [64, 147, 149] .	22
2.14	Vergleich der langfristigen Entwicklung der Gradtagzahl bezogen auf die Heizgrenze $15^{\circ}\text{C}$ und des Endenergieverbrauchs für Raumwärme in Deutschland. Abgeleitet aus Datenquellen: [64, 147, 152, 153] . . . . .	23
2.15	Entwicklung des Nutzungsgrades von Ölheizungsanlagen in Deutschland. Hierbei gilt folgendes: weißer Kreis = oberer Intervallwert von Studien mit Intervallbereich, schwarzer Kreis = unterer Intervallwert von Studien mit Intervallbereich, schwarzes Dreieck = Einzelwert von Studien ohne Intervallangaben, schwarzes Quadrat = Gesamtnutzungsgrad nach Nutzungsbereich unabhängig vom Energieträger, z.B. für Raumwärme allgemein. Datenquellen: [154, 156, 159-165, 167-169] . . . . .	25
2.16	Entwicklung des Nutzungsgrades von Anlagen zur Bereitstellung von Raumwärme (RW) mit verschiedenen Energiequellen. Abgeleitet aus Datenquellen: [154, 156, 157, 160-164, 168-171] . . . . .	26
2.17	Entwicklung des Nutzungsgrades für Warmwasserbereitstellung (WW) mit verschiedenen Energiequellen. Abgeleitet aus Datenquellen: [154, 161-165, 168, 169] . . . . .	27
2.18	Vergleich zwischen der langfristigen Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach BMWi [64] und dem berechneten Nutzenergieverbrauch . . . . .	28
2.19	Vergleich zwischen den Daten für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor nach BMWi [64] und verschiedenen Prognosen des zukünftigen Endenergiebedarfs. Datenquellen: [65-67] . . . .	28

3.1	Vergleich zwischen dem tatsächlich aufgetretenen Endenergieverbrauch und dem mit MEDEE (Szenarien A, B und C) prognostizierten Endenergiebedarf im französischen Wohnungs- und GHD Sektor. Daten für den tatsächlichen Verbrauch: Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2014 [123]. Daten zum mit MEDEE prognostizierten Endenergiebedarf: Chateau et al. 1979 [187] . . . . .	35
3.2	Vergleich zwischen dem tatsächlich aufgetretenen Endenergieverbrauch und dem mit BREHOMES (Szenarien A, B, D,C,D,E,F und G) prognostizierten Endenergiebedarf im britischen Wohnungssektor. Daten für den tatsächlichen Verbrauch: DECC, 2013 [71]. Daten zum mit BREHOMES prognostizierten Endenergiebedarf: Shorrock und Dunster, 1997 [20] für Szenarien A und B sowie Shorrock et al. 2005 [188] für Szenarien C,D,E,F und G . . . .	36
3.3	Allgemeiner Ansatz zur Entwicklung eines „Top-Down-“ und „Bottom-Up“-Modells . . . . .	41
3.4	Schaubild zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Niveaus im Detaillierungsgrad grundlegender Eingangsparameter für Prognosemodelle im Wohnungssektor . . . . .	46
3.5	Anzahl der Wohnungen im deutschen Wohngebäudebestand nach Baujahr und Gebäudetyp. EFH: Einfamilienhaus, RH: Reihenhauses, MFH: Mehrfamilienhaus, GMH: großes Mehrfamilienhaus. Datenquelle: [41] . . . . .	51
3.6	Vergleich des spezifischen Endenergieverbrauchs im Bereich Raumwärme und Warmwasser für die Modelle BSM und FfE-Gebäudemodell für ein repräsentatives Einfamilienhaus (EFH). Daten für BSM abgeleitet aus Datenquelle: [27] und Daten für das FfE-Gebäudemodell abgeleitet aus Datenquellen: [25, 35] . . . . .	56
4.1	Histogramm und Wahrscheinlichkeitsfunktion der Durchschnittstemperatur im Januar in Deutschland, basierend auf langfristigen Daten zwischen 1948 und 2013. Abgeleitet aus Datenquelle: [223] . . . . .	69
4.2	Histogramm Gradtagzahl bezogen auf die Heizgrenze 15°C in Deutschland zwischen 1990 und 2000, abgeleitet aus Datenquelle: [241] . .	70
4.3	Beispiel für die Entwicklung eines dynamischen Eingangsparameters, in diesem Fall die Anzahl der Wohnungen in Deutschland, abgeleitet aus Datenquelle: [241] . . . . .	71

4.4	Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten Endenergieverbrauch im Referenz- und Prognosezeitraum und dem modellierten Endenergiebedarf der statistischen Modelle REM, BSM, MAED-2, FfE-Gebäudemodell, LEAP-A (unter Nutzung der originalen Projektionen für den Endenergieverbrauch für Raumwärme und die Anzahl der Wohnungen) und LEAP-B (unter Berücksichtigung von Veränderungen im Trend des Endenergieverbrauchs für Raumwärme aufgrund der Energieeinsparverordnung [251] und der Anzahl der Wohnungen) . . . . .	76
4.5	Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten Endenergieverbrauch im Referenz- und Prognosezeitraum und dem modellierten Endenergiebedarf der bauphysikalischen Modelle ECCABS, CDEM, BREHOMES-A (unter Berücksichtigung der ursprünglichen BREDEM Algorithmen für die Anzahl der Wohnungen) und BREHOMES-B (unter Berücksichtigung von Anpassungen der Original-Algorithmen) . . . . .	79
4.6	Vergleich der Ergebnisse der mit CDEM für den britischen und den deutschen Wohnungssektor erzielten normalisierten Sensitivitätskoeffizienten, Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des britische Wohnungssektors aus Datenquelle: [62] . . . . .	85
4.7	Ergebnisse der mit MAED-2 für den deutschen Wohnungssektors erzielten normalisierten Sensitivitätskoeffizienten (EFH – Einfamilienhaus, MFH – Mehrfamilienhaus) . . . . .	86
4.8	Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit BREHOMES-A berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern) . . . . .	90
4.9	Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit BREHOMES-B berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern) . . . . .	90
4.10	Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit LEAP berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern) . . . . .	91
4.11	Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit BSM berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern) . . . . .	91
4.12	Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit FfE-Gebäudemodell berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern) . . . . .	92
4.13	Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit REM berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern) . . . . .	92
4.14	Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit MAED-2 berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern) . . . . .	93

4.15	Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit CDEM berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern) . . . . .	93
4.16	Konfidenzintervalle der relativen Abweichungsfehler der acht übertragbaren Modelle (REM, BSM, MAED-2, FfE-Gebäudemodell, LEAP-B, ECCABS, CDEM, BREHOMES-B), aufgeteilt in bauphysikalische und statistische Modelle (s. Table 4-5 für die individuelle Ergebnisse der Modelle) . . . . .	96
5.1	Struktur des TREM-Modells zur Bestimmung des Endenergieverbrauchs im Referenzjahr $t_R$ und Erweiterung des Endenergiebedarfsmoduls zur Bestimmung der wahrscheinlichsten Variation der Endenergiekennwerte und Prognose des Endenergiebedarfs im Prognosejahr $t$ . (1) bis (7): Modellierungsschritte . .	101
5.2	Wahrscheinlichkeitsfaktoren für Neubauten in Deutschland, Datenquelle: DESTATIS [23, 243, 257] . . . . .	105
5.3	Ergebnisse der elf wahrscheinlichsten Werte für die Entwicklung der Anzahl der Neubauten in Deutschland im Jahr 2001, basierend auf den Wahrscheinlichkeitsfaktoren für Neubauten (Abbildung 5.2) und Gleichung 5.3 . . . . .	105
5.4	Wahrscheinlichkeitsfaktoren für Gebäudeabriss ohne Ersatzbau ( $WfA_{oeb}$ ) und Sanierung ( $WfSG$ ), Datenquellen: [23, 243, 257]. . . . .	106
5.5	Entwicklung der Anzahl der Gebäude in Deutschland entsprechend der Simulation mit TREM . . . . .	106
5.6	Energiekennwerte des Endenergieverbrauchs nach Nutzungsbereichen für drei ausgewählte Haus-Archetypen in Deutschland, Datenquellen: [17, 152] . . . . .	108
5.7	Entwicklung der zur Berechnung des Korrekturfaktors für die Raumwärme herangezogenen Gradtagzahlen (GTZ) in Deutschland von 1990–2012, Datenquellen: [147, 153] . . . . .	110
5.8	Unterschied zwischen der Bestimmung von Gradtagzahlen und Heizgradtagen am Beispiel eines Gebäudes mit einer Heizgrenztemperatur von 12°C. Abgeleitet aus Datenquelle: [153] . . . . .	112
5.9	Heizgrenztemperatur für Gebäude mit unterschiedlichen nutzflächenspezifischen Wärmeverlusten $h$ [ $W/m^2K$ ]. Abgeleitet aus Datenquelle: [262] . . . . .	113
5.10	Heizgrenztemperatur für Gebäude mit einem nutzflächenspezifischen Wärmeverlust $h = 5$ [ $W/m^2K$ ] . . . . .	114
5.11	Heizgrenztemperatur für Gebäude mit einem nutzflächenspezifischen Wärmeverlust $h = 0,5$ [ $W/m^2K$ ] . . . . .	114
5.12	Algorithmus-A zur Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung von Wahrscheinlichkeitsfaktoren für Raumwärme ( $Wf_{a,s,k,rw}$ ) aufgrund der Variation von Innen- und Außentemperatur am Beispiel eines Gebäudetyps mit einem nutzflächenspezifischen Wärmeverlust $h = 5$ [ $W/m^2K$ ] . . . . .	115

5.13	Muster von Wahrscheinlichkeitsbändern der Entwicklung des durchschnittlichen Nutzungsgrades für die Bereitstellung von Raumwärme in Deutschland. Abgeleitet aus Datenquellen: [156,160-163,165,169,170] . . . . .	120
5.14	Vergleich statistischer Daten für den Nutzungsgrad für Raumwärme von UK und Chile (CL) für spezifische Jahre sowie das Muster von Wahrscheinlichkeitsbändern des TREM-Modells. Datenquellen: [19, 38, 263] . . . . .	120
5.15	Anpassung des durchschnittlichen Nutzungsgrades zur Bestimmung der zukünftigen Entwicklung für Raumwärme für das Fallbeispiel Chile . .	121
5.16	Unterschied zwischen dem Muster der Wahrscheinlichkeitsbänder des TREM-Modells und der möglichen tatsächlichen Entwicklung des Nutzungsgrades für Raumwärme . . . . .	121
5.17	Vergleich zwischen statistischen Daten für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor (BMWi) und den Modellergebnissen für die Entwicklung des Endenergiebedarfs (TREM) für Raumwärme . . .	124
5.18	Vergleich zwischen statistischen Daten für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor (BMWi) und den Modellergebnissen für die Entwicklung des Endenergiebedarfs (TREM) für Warmwasserbereitstellung . . . . .	124
5.19	Vergleich zwischen statistischen Daten für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor (BMWi) und den Modellergebnissen für die Entwicklung des Endenergiebedarfs (TREM) für den Nutzungsbereich Kochen . . . . .	125
5.20	Vergleich zwischen statistischen Daten für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor (BMWi) und den Modellergebnissen für die Entwicklung des Endenergiebedarfs (TREM) für Beleuchtung und Elektrogeräte . . . . .	125
5.21	Durchschnittlicher monatlicher Endenergiebedarf im deutschen Wohnungssektor für das Jahr 2010 entsprechend der Simulation mit dem TREM-Modell . . . . .	126
5.22	Monatliche Schwankungen des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor für das Jahr 2010 und 2030, entsprechend der Simulation mit dem TREM-Modell . . . . .	127
5.23	Vergleich zwischen der vom BMWi [64, 151] ermittelten und der mit dem TREM-Modell simulierten Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor . . . . .	129
5.24	Vergleich des prognostizierten Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor bis 2030 mit dem TREM-Modell und verschiedenen Prognosen [65-67] mit den statistischen Daten des BMWi [64] bis 2014 . . . . .	131

6.1	Vergleich der durchschnittlichen Pro-Kopf-Bruttonationaleinkommens (Bezugsjahr 2013) und des durchschnittlichen Endenergieverbrauchs pro Wohnung in Deutschland, UK und Chile. Daten des Pro-Kopf-Bruttonationaleinkommens: [265]. Daten des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor basierend auf: [64, 129, 130]. Daten zur Anzahl der Wohnungen abgeleitet aus Datenquellen: [23, 135, 266]	134
6.2	Vergleich der Anzahl der Wohnungen und der durchschnittlichen jährlichen Minimal- und Maximalwerte für die Außentemperatur. Daten zur Anzahl der Wohnungen abgeleitet aus Datenquellen: [23, 135, 266]. Daten der mittleren jährlichen Minimal- und Maximaltemperatur abgeleitet aus Datenquellen: [268-270]	134
6.3	Vergleich zwischen der Anzahl der Wohngebäude und der mittleren Außentemperatur im Juni (Referenzjahr 2000) nach Klimazonen in Chile. Datenquellen: [266, 274]	137
6.4	Vergleich zwischen dem Endenergiebedarf im Wohnungssektor nach Klimazonen in Chile. Abgeleitet aus Datenquellen: [103, 263]	137
6.5	Monatlicher Endenergiebedarf im chilenischen Wohnungssektor entsprechend der Simulation mit dem TREM-Modell für das zehnte Jahr der Prognose (2010) in Klimazone 1	138
6.6	Monatlicher Endenergiebedarf im chilenischen Wohnungssektor entsprechend der Simulation mit dem TREM-Modell für das zehnte Jahr der Prognose (2010) in Klimazone 7	138
6.7	Monatlicher Endenergiebedarf im gesamten chilenischen Wohnungssektor entsprechend der Simulation mit dem TREM-Modell für das zehnte Jahr der Prognose (2010)	139
6.8	Vergleich zwischen der von der CNE [91] ermittelten und der mit dem TREM-Modell simulierten Entwicklung des Endenergiebedarfs	140
6.9	Monatlicher Endenergiebedarf im britischen Wohnungssektor entsprechend der Simulation mit dem TREM-Modell für das zehnte Jahr der Prognose (2010)	141
6.10	Vergleich zwischen der vom DECC [71, 109] ermittelten und der mit dem TREM-Modell simulierten Entwicklung des Endenergiebedarfs	142
6.11	Vergleich zwischen dem statistisch ermittelten nationalen Endenergieverbrauch und den mit dem TREM-Modell erstellten Wahrscheinlichkeitsbändern des Endenergiebedarfs im finalen Jahr der Prognose (2010) für Deutschland (a), Chile (b) und UK (c). Datenquellen: BMWi [64], CNE [91] und DECC [71, 109]	143
A.1	Energieumwandlungskette abgeleitet aus Datenquelle: [282]	179
C.1	Entwicklung des Nutzungsgrades von Ölheizungsanlagen	194
C.2	Entwicklung des Nutzungsgrades von Gasheizungsanlagen	195
C.3	Entwicklung des Nutzungsgrades von Elektroheizgeräten	195

C.4	Entwicklung des Nutzungsgrades von Fernwärmeheizungen . . . . .	196
C.5	Entwicklung des Nutzungsgrades von Kohlekesseln . . . . .	197
C.6	Entwicklung des Nutzungsgrades von Heizungsanlagen betrieben mit sonstigen inkl. erneuerbaren Energien . . . . .	198
C.7	Entwicklung des Nutzungsgrades von Warmwasseranlagen betrieben mit Öl . . . . .	199
C.8	Entwicklung des Nutzungsgrades von Warmwasseranlagen betrieben mit Gas . . . . .	200
C.9	Entwicklung des Nutzungsgrades von Warmwasseranlagen betrieben mit Strom . . . . .	201



## Tabellenverzeichnis

3.1	Bestehende Modelle zur Bestimmung des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor . . . . .	32
3.2	Vergleichende Zusammenfassung der Hauptcharakteristika der 12 untersuchten Modelle, geordnet nach Modellansatz in bottom-up statistische und bottom-up bauphysikalische Modelle . . . . .	43
3.3	Wärmetransferkoeffizient $H_3$ zwischen beheizten und unbeheizten Zonen [38] . . . . .	58
3.4	Gleichungen zur Berechnung des Endenergiebedarfs für Kochen. Quelle: basierend auf Anderson et al. 2010 [38] . . . . .	61
4.1	Ansatz zur Unterteilung und Interpretation des Korrelationskoeffizienten, nach Zühlke, 2007 [230] . . . . .	66
4.2	Wahrscheinlichkeitsfunktion für ausgewählte einflussreiche Eingangsparameter . . . . .	72
4.3	Modelleingangsparameter und die zugehörigen Datenquellen für den deutschen Wohnungsbestand . . . . .	73
4.4	Zusammenfassung der Anpassungen und Veränderungen der Modelle, um die Übertragbarkeit auf den deutschen Wohnungssektor zu gewährleisten . . . . .	74
4.5	Ergebnisse für die Genauigkeit der übertragbaren Modelle für das Fallbeispiel des deutschen Wohnungssektors entsprechend den im Abschnitt 4.1 definierten Parametern . . . . .	81
4.6	Gruppierung der Eingangsparameter für Energiemodelle im Wohnungssektor nach ihrem Einfluss- und Aufschlüsselungsgrad . . . . .	88
4.7	Absolute Differenz des errechneten 90%igen Konfidenzintervalls im Vergleich zum modellierten Mittelwert für den Endenergiebedarf im deutschen Wohnungssektor . . . . .	95
6.1	Modelleingangsparameter mit den zugehörigen Datenquellen für die Simulation mit dem TREM-Modell in Chile und dem UK . . . . .	135
6.2	Absolute Differenz des errechneten 90%igen Konfidenzintervalls zu den mit dem TREM-Modell modellierten Mittelwerten des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor für Deutschland, Chile und das UK . . . . .	144
6.3	Ergebnisse für die Genauigkeit des TREM-Modells für die Bestimmung des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor verschiedener Länder entsprechend den im Abschnitt 4.1. definierten Parametern . . . . .	145
C.1	Langfristige Entwicklung des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor . . . . .	189

C.2	Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Nutzungsbereichen im deutschen Wohnungssektor für den Zeitraum 1996–2007 nach Öko-Institut und Fraunhofer-ISI [147] . . . . .	190
C.3	Angaben zum Jahresnutzungsgrad von Geräten zur Energienutzung im Wohnungssektor in Deutschland, entsprechend der verwendeten Endenergie . . . . .	192
C.4	Entwicklung der Jahresnutzungsgrade nach Nutzungsbereichen (%) . . . .	204
C.5	Unterteilung des Nutzenergieverbrauchs nach Energiequellen . . . . .	205
C.6	Entwicklung der Anzahl der Gebäude und Wohnungen in Deutschland . . . . .	206
C.7	Deutsche Gebäudetypologie . . . . .	207
C.8	Entwicklung des Verhältnisses der Wohnfläche pro Person in Deutschland . . . . .	208
C.9	Spezifischer Endenergieverbrauch pro Wohnung . . . . .	209
C.10	Endenergieverbrauchskennwerte für Raumwärme und Warmwasser nach Gebäudetyp für das BSM-Modell Datenquelle: [27] . . . . .	210
C.11	Nutzenergieverbrauchskennwerte für Raumwärme und Warmwasser nach Gebäudetyp für das FfE-Gebäudemodell. Datenquelle: abgeleitet aus [16] . . . . .	210
C.12	Nutzenergieverbrauchskennwerte für Raumwärme und Warmwasser nach Gebäudetyp für das REM-Modell. Datenquelle: abgeleitet aus [41] . .	210
C.13	Bevölkerungsentwicklung, Anzahl der Wohnungen, Personen pro Wohnung und Gradtagzahl nach Jahr . . . . .	211
C.14	Gebäudedaten für Simulationen mit bauphysikalischen Modellen (Wohnfläche, Bauteilflächen, U-Werte, spezifischer Wärmeverlust). Datenquelle: Studie „Deutsche Gebäudetypologie“ des IWU [17, 41, 290] . . . . .	212
C.15	Klimadaten für Deutschland . . . . .	213
C.16	Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen im deutschen Wohnungssektor. Datenquelle: [64] . . . . .	214
C.17	Primärenergiefaktoren und CO <sub>2</sub> -Emissionfaktoren nach Energieträger. Datenquelle: [164] . . . . .	214
C.18	Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Eingangsparameter . . . . .	215
C.19	Gebäudeanzahl in den korrespondierenden Zeiträumen der Baualtersklasse nach Corradini et al. [16] (Gl. D-2.2) . . . . .	218

## Nomenklatur

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
$A$	$m^2$	Fläche
$AW_{t_R}$	Tsd.	Anzahl der Wohnungen im Referenzjahr $t_R$
$AW(t)$	Tsd.	Anzahl der Wohnungen im Jahr $t$
$AW_q(t)$	Tsd.	Anzahl der Wohnungen im Jahr $t$ nach Nutzung einer Energiequelle
$AW_{tot}(t)$	Tsd.	gesamte Anzahl der Wohnungen im Jahr $t$
$AW_{tot,t_R}$	Tsd.	gesamte Anzahl der Wohnungen im Referenzjahr $t_R$
$AW_{t_R,s}$	Tsd.	Anzahl der Wohnungen im Referenzjahr $t_R$ nach Haus-Archetyp $s$
$A_{meb}$	—	Abriss mit Ersatzbau
$A_{meb,a,s,k}(t)$	—	Abriss mit Ersatzbau im Jahr $t$ nach Baujahr Haus-Archetyp und Klimazone
$A_{oeb}$	—	Abriss ohne Ersatzbau
$A_{oeb,a,s,k}(t)$	—	Abriss ohne Ersatzbau im Jahr $t$ nach Baujahr Haus-Archetyp und Klimazone
$C$	$J/K$	effektive Wärmekapazität des gesamten Gebäudes
$CO_2$	Tonnen	CO <sub>2</sub> -Emissionen
$DD\{T_{b1}\}$	$K$	Monatliche Gradtagzahl für eine beheizte Zone
$DD\{T_{b2}\}$	$K$	Monatliche Gradtagzahl für eine unbeheizte Zone
$EEB_{ges}(t)$	$MWh/a$	Entwicklung des Endenergiebedarfs im Jahr $t$
$EEB_{eb}(t)$	$MWh/a$	Endenergiebedarf für Elektrogeräte und Beleuchtung im Jahr $t$
$EEB_{eb,a,s}(t)$	$MWh/a$	Endenergiebedarf für Elektrogeräte und Beleuchtung im Jahr $t$ nach Baujahr und Haus-Archetyp
$EEB_{ko}(t)$	$MWh/a$	Endenergiebedarf für Kochen im Jahr $t$
$EEB_{ko,a,s}(t)$	$MWh/a$	Endenergiebedarf für Kochen im Jahr $t$ nach Baujahr und Haus-Archetyp
$EEB_{rw}$	$MWh/a$	Endenergiebedarf für Raumwärme
$EEB_{rw}(t)$	$MWh/a$	Endenergiebedarf für Raumwärme im Jahr $t$
$EEB_{rw,a,s}(t)$	$MWh/a$	Endenergiebedarf für Raumwärme im Jahr $t$ nach Baujahr und Haus-Archetyp
$EEB_{ww}(t)$	$MWh/a$	Endenergiebedarf für Warmwasserbereitung im Jahr $t$
$EEE_{kk}$	—	Gleichungen Endenergiebedarf für Kochen
$EF_q$	$gCO_2/kWh$	Emissionsfaktoren nach Energiequelle

$E_{is}$	$TWh/a$	simulierter Endenergieverbrauch eines Jahres $i$
$E_{it}$	$TWh/a$	tatsächlicher Endenergieverbrauch eines Jahres $i$
$E_{LA}$	$GJ/a$	Elektrizitätsenergiebedarf
$EEVK$	$MWh/a$	durchschnittlicher Endenergieverbrauchskennwert
$EEVK_{nb}$	$MWh/a$	durchschnittlicher spezifischer Endenergieverbrauchskennwert nach Nutzungsbereich
$EEVK_{a,s,k,nb}$	$MWh/a$	durchschnittlicher spezifischer Endenergieverbrauchskennwert nach Nutzungsbereich, Baujahr, Haus-Archetyp und Klimazone
$EEVK_{a,s,k,nb,t_R}$	$MWh/a$	kalibrierter spezifischer Endenergieverbrauchskennwert im Referenzjahr $t_R$
$EEVK_{rw,t_R}$	$MWh/a$	Endenergiekennwerte für Raumwärme im Referenzjahr $t_R$
$EEVK_{ww}$	$MWh/a$	durchschnittlicher spezifischer Endenergieverbrauchskennwert für Warmwasserbereitung
$EEVK_{ww,wf}$	$W/m^2$	durchschnittlicher spezifischer Endenergieverbrauch für Warmwasser pro Wohnfläche
$GB_{a,s}(t)$	Tsd.	Anzahl der Gebäude im Jahr $t$ nach Baujahr und Haus-Archetyp
$GB_{a,s,k}(t)$	Tsd.	Anzahl der Gebäude im Jahr $t$ nach Baujahr, Haus-Archetyp und Klimazone
$GB_{a,s,r,t_R}$	Tsd.	Anzahl der Gebäude im Referenzjahr $t_R$ nach Baujahr, Haus-Archetyp und Region
$GB_{a,s,k,t_R}$	Tsd.	Anzahl der Gebäude im Referenzjahr $t_R$ nach Baujahr, Haus-Archetyp und Klimazone
$GB_{tot,a,s}(t)$	Tsd.	gesamte Anzahl der Gebäude im Jahr $t$ nach Baujahr und Haus-Archetyp
$GB_{tot,s,r}(t)$	Tsd.	gesamte Anzahl der Gebäude im Jahr $t$ nach Haus-Archetyp und Region
$GB_{tot,s,k}(t)$	Tsd.	gesamte Anzahl der Gebäude im Jahr $t$ nach Haus-Archetyp und Klimazone
$GB_{tot,a,s,k}(t)$	Tsd.	gesamte Anzahl der Gebäude im Jahr $t$ nach Baujahr, Haus-Archetyp und Klimazone
$GB_{t_R,a,s}$	Tsd.	Anzahl der Gebäude im Referenzjahr $t_R$ nach Baujahr und Haus-Archetyp
$GEEB_{G_s}$	$TWh/a$	Gesamtendenergiebedarf für alle Haus-Archetypen
$GEEV$	$TWh/a$	Gesamtendenergieverbrauch
$GTZ$	$Kd$	Gradtagzahl

$GTZ_d$	$Kd$	Gradtagzahl im langjährigen Durchschnitt
$GTZ_{t_M}$	$Kd$	Gradtagzahl im Messjahr
$GR$	%	Wachstumsrate
$H_D$	–	Verhältnis zwischen Wärmetransferkoeffizienten $H_3$ und $H_2 + H_3$
$H_T$	$W/K$	Wärmetransferkoeffizient für Transmission eines Gebäudes
$H_V$	$W/K$	Wärmetransferkoeffizient für Lüftung eines Gebäudes
$H_1$	$W/K$	Wärmetransferkoeffizient für Transmission einer beheizten Zone
$H_2$	$W/K$	Wärmetransferkoeffizient für Transmission einer unbeheizten Zone
$H_3$	$W/K$	Wärmetransferkoeffizient für Transmission zwischen einer beheizten $H_2$ und unbeheizten Zone $H_2$
$h$	$W/m^2K$	nutzflächenspezifischer Wärmeverlust
$h_{a,s}$	$W/m^2K$	nutzflächenspezifischer Wärmeverlust nach Haus-Archetyp und Baujahr
$HGT$	$Kd$	Heizgradtage
$I_{HW}$	$mm$	Dämmung des Warmwasserspeichers
$KFt$	–	Korrekturfaktor für Gradtagzahl
$K_r$	–	statistische Korrekturfaktor
$MEEVK$	$MWh/a$	gemessener Endenergieverbrauchskennwert
$MPD$	–	Mittelwert der prozentualen Differenz
$N$	–	Anzahl der Nutzer
$n$	%	Nutzungsgrad
$n_{a,s,k,nb,t_R}$	%	Nutzungsgrad der Anlagen/Geräte
$n_{a,s,k,nb}(t)$	%	Nutzungsgrad der Anlagen/Geräte im Jahr t im Referenzjahr $t_R$
$\bar{n}$	%	durchschnittlicher Nutzungsgrad
$\bar{n}_{ko}$	%	durchschnittlicher Nutzungsgrad für Elektrogeräte und Beleuchtung
$\bar{n}_{ww}$	%	durchschnittlicher Nutzungsgrad für Warmwasserbereitung
$\bar{n}_{ko}$	%	durchschnittlicher Nutzungsgrad für Kochen
$NB_{df}$	–	Neubauten auf Basis demografischer Faktoren
$NB_{df,s,k}(t)$	–	Neubauten auf Basis demografischer Faktoren im Jahr t

		nach Haus-Archetyp und Klimazone
$NB_{eb}$	–	Neubauten Ersatzbau
$NB_{eb,s,k}(t)$	–	Neubauten Ersatzbau im Jahr $t$
		nach Haus-Archetyp und Klimazone
$NE$	$MWh/a$	Nutzenergiebedarf
$NE_{a,s,k,nb,t_R}$	$MWh/a$	Kennwert für den Nutzenergiebedarf im Jahr $t_R$
$NE_{a,s,k,nb}(t)$	$MWh/a$	Kennwert für den Nutzenergiebedarf im Jahr $t$
$NEVK_{rw,q}$	$MWh/a$	Nutzenergieverbrauchskennwert für Raumwärme ( $rw$ ) nach Energiequelle ( $q$ )
$NEVK_{ww,a,s}$	$MWh/a$	Nutzenergieverbrauchskennwert für Warmwasser- bereitung ( $ww$ ) nach Baujahr und Haus-Archetyp
$NEVK_{ko,a,s}$	$MWh/a$	Nutzenergieverbrauchskennwert für Kochen ( $ko$ ) nach Baujahr und Haus-Archetyp
$NEVK_{eb,a,s}$	$MWh/a$	Nutzenergieverbrauchskennwert für Elektrogeräte und Beleuchtung ( $eb$ ) nach Baujahr und Haus-Archetyp
$NEVK_{rw,a,s}$	$MWh/a$	Nutzenergieverbrauchskennwert für Raumwärme nach Baujahr und Haus-Archetyp
$PEB_q$	$TWh/a$	Primärenergiebedarf nach Energiequelle
$Ph$	–	Reaktionsfähigkeit eines Heizsystems
$P_{t_R}$	–	Bevölkerungszahl im Referenzjahr $t_R$
$P(t)$	–	Prognose für die Bevölkerungszahl im Jahr $t$
$P_{we}$	$P/WE$	Personen pro Wohnung
$Q_h$	$GJ/a$	jährlicher Endenergiebedarf eines Gebäudes (beheizte und unbeheizte Zonen)
$Q_{pp}$	$W$	Wärmeverlust zwischen Kessel und Warmwasser- speicher
$Q_s$	$W$	Warmwasserversorgung durch Solarenergie
$Q_t$	$W$	Wärmeverlust im Warmwasserspeicher
$Q_u$	$W$	Warmwasserbedarf bezogen auf die Anzahl der Nutzer
$Q_d$	$W$	Wärmeverlust zwischen Warmwasserspeicher und Wasserhahn
$Q_{h1}$	$GJ/a$	jährlicher Endenergiebedarf eines Gebäudes (beheizte Zonen)
$Q_{h2}$	$GJ/a$	jährlicher Endenergiebedarf eines Gebäudes (unbeheizte Zonen)
$r$	–	Korrelationskoeffizient
$S$	%	eventuelle Sättigung
$S_i$	–	Sensitivitätskoeffizient

$S_{i,j}$	–	normalisierter Sensitivitätskoeffizient
$SG_{a,s,k}(t)$	–	Sanierte Gebäude im Jahr t nach Baujahr, Haus-Archetyp und Klimazone
$SG_{a,s,r}(t)$	–	Sanierte Gebäude im Jahr t nach Baujahr, Haus-Archetyp und Region
$V_{HW}$	$l$	Volumen des Warmwasserspeichers)
$WF$	$m^2$	Wohnfläche
$Wf$	–	Wahrscheinlichkeitsfaktor
$Wf_{a,s,k,rw}$	–	Wahrscheinlichkeitsfaktor ermittelt entsprechend dem Algorithmus-A in Abb. 5.12
$Wf_{a,s,k,nb}$	–	Wahrscheinlichkeitsfaktor nach Baujahr, Haus-Archetyp, Klimazone und Nutzungsbereiche
$WfA_{oeb}$	–	Wahrscheinlichkeitsfaktor für den Abriss von Gebäuden ohne Ersatzbau
$WfSG_{oeb}$	–	Wahrscheinlichkeitsfaktor für Sanierungen
$WfNB_{df}$	–	Wahrscheinlichkeitsfaktor für Neubauten auf Basis demografischer Faktoren
$WfNB_{eb}$	–	Wahrscheinlichkeitsfaktor für Ersatzbau
$\eta$	%	Wirkungsgrad
$\Theta_e$	$^{\circ}C$	mittlere Außentemperatur des jeweiligen Heiztages
$\Theta_h$	$^{\circ}C$	Heizgrenztemperatur
$\Theta_{gh}$	$^{\circ}C$	durchschnittliche Heizgrenztemperatur in Relation zum Wärmeverlust
$\Theta_i$	$^{\circ}C$	mittlere Innentemperatur
$\Theta_{rmin}$	$K$	gewünschte Innentemperatur
$\Theta_{int}(t + \Delta t)$	$K$	zeitabgängige Innentemperatur
$\sigma_{xy}$	–	Kovarianz ( $X, Y$ )
$\sigma_x$	–	Standardabweichung der Variable $X$
$\sigma_y$	–	Standardabweichung der Variablen $Y$





## Indizes

Zeichen	Bezeichnung
<i>a</i>	Baujahr
<i>eb</i>	Elektrogeräte und Beleuchtung
<i>j</i>	Anzahl der untersuchten Jahre
<i>k</i>	Klimazone
<i>ko</i>	Kochen
<i>nb</i>	Nutzungsbereiche (z.B. Warmwasser, Kochen, Beleuchtung, Elektrogeräte)
<i>q</i>	Energiequelle
<i>r</i>	Region
<i>s</i>	Haus-Archetyp
<i>rw</i>	Raumwärme
<i>t</i>	Zeitangabe
<i>t<sub>M</sub></i>	Messjahr
<i>t<sub>0</sub></i>	Jahr der Inbetriebnahme
<i>t<sub>R</sub></i>	Referenzjahr
<i>we</i>	Wohneinheit
<i>ww</i>	Warmwasserbereitung
<i>z</i>	Anzahl der meteorologischen Heiztage



## Abkürzungsverzeichnis

<b>AGEB</b>	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
<b>BBSR</b>	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
<b>BMWi</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
<b>BRE</b>	Building Research Establishment
<b>BREDEM</b>	BRE Domestic Energy Model (Kernrechner für BREHOMES und CDEM)
<b>BREHOMES</b>	Building Research Establishment Housing Model for Energy Studies
<b>BSM</b>	Building-Stock-Model
<b>CDEM</b>	Community Domestic Energy Model
<b>CHM</b>	Cambridge Housing Model
<b>CL</b>	Chile
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>CREEM</b>	Canadian Residential Energy End-use Model
<b>DE</b>	Deutschland
<b>DECarb</b>	Domestic Energy and Carbon emissions
<b>DECM</b>	Domestic Energy and Carbon Model
<b>DENA</b>	Deutsche Energie-Agentur
<b>DESTATIS</b>	Statistisches Bundesamt
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>DSA</b>	Differential Sensitivity Analysis
<b>DWD</b>	Deutscher Wetterdienst
<b>EABS</b>	Energy Assessment of Building Stocks (Kernrechner für ECCABS)
<b>ECCABS</b>	Energy, Carbon and Costs Assessment of Building Stocks
<b>EFH</b>	Einfamilienhaus
<b>EHS</b>	English Housing Survey
<b>EnEV</b>	Energieeinsparverordnung

<b>EPASS</b>	Energiepass (heute allgemein Energieausweis)
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>E2M2S</b>	European electricity market model
<b>FfEG</b>	Forschungsstelle für Energiewirtschaft Gebäudemodell
<b>FfE</b>	Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
<b>GHD</b>	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
<b>GMFH</b>	großes Mehrfamilienhaus
<b>GRE</b>	Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e.V.
<b>HOT2000</b>	Kernrechner für das Modell CREEM
<b>ISOTEG</b>	Instrumente für Klimagasreduktionsstrategien
<b>ISOTEG</b>	Initiative Systeme und Optimierte Techniken zur energetischen Gebäudesanierung
<b>IWU</b>	Institut Wohnen und Umwelt
<b>LEAP</b>	Long-range Energy Alternatives Planning
<b>MAED-2</b>	Model for Analysis of Energy Demand
<b>MCA</b>	Monte Carlo Analysis
<b>MEDEE</b>	Modèle d'évaluation de la demande en énergie
<b>MFH</b>	Mehrfamilienhaus
<b>NEWAGE</b>	National European Worldwide Applied General Equilibrium
<b>NSC</b>	normalisierter Sensitivitätskoeffizient
<b>PROBAS</b>	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente
<b>REEPS</b>	Residential End-Use Energy Planning System
<b>REM</b>	Regional Engineering Model
<b>RH</b>	Reihenhaus
<b>SAP</b>	Standard Assessment Procedure
<b>THA</b>	Thailand
<b>TIMES PanEU</b>	The Integrated MARKAL-EFOM System, europäisches Energiesystemmodell
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt

<b>UK</b>	Vereinigtes Königreich
<b>UKDCM</b>	United Kingdom Domestic Carbon Model
<b>WärmeschutzV</b>	Wärmeschutzverordnung
<b>WE</b>	Wohneinheit
<b>ZFH</b>	Zweifamilienhaus



## **Ehrenwörtliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle unmissverständlich gekennzeichnet.

Es waren keine weiteren Personen an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderen Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich versichere ehrenwörtlich, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit gesagt und nichts verschwiegen habe.

Weimar, 07.10.2016

Aner Martinez Soto





# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Der weltweite Primärenergieverbrauch<sup>1</sup> ist in den letzten Jahren stark angestiegen und war 2012 in allen Sektoren (Industrie, GHD, Wohnen, Verkehr und Landwirtschaft) mehr als doppelt so hoch (560 EJ) wie noch im Jahr 1971 (223 EJ) [52]. Prognosen zeigen, dass der Primärenergiebedarf<sup>1</sup> und die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter steigen werden, wenn keine Maßnahmen zu dessen Senkung getroffen werden [53]. Für das Jahr 2050 wird der globale Primärenergiebedarf auf der Basis der heutigen Entwicklung auf ca. 918 EJ geschätzt [53, 54].

Mehr als ein Viertel des weltweiten Endenergieverbrauchs (29%) entfällt derzeit auf den Wohnungssektor [55, 56], wodurch dieser Sektor ein großes Einsparpotenzial besitzt. Dieses Einsparpotential kann aber nur genutzt werden, wenn geeignete strukturpolitische Maßnahmen und Gesetze entwickelt und entsprechende Energieeinsparmaßnahmen angewendet werden. Hierzu werden Informationen zur zukünftigen Entwicklung des Energiebedarfs und zu den Faktoren, die diesen Bedarf und den dazugehörigen tatsächlichen Verbrauch beeinflussen, benötigt. Aus diesem Grund sind in den letzten Jahren verschiedene Modelle entwickelt worden, die eine quantitative Beurteilung sowohl zum aktuellen als auch zum zukünftigen Energiebedarf, auf Basis der Auswirkungen verschiedener Maßnahmen, ermöglichen.

Obwohl Prognosemodelle prinzipiell eine Lösung zur Bestimmung des Energiebedarfs und zur Beurteilung der Auswirkungen von zukünftigen Energieeinsparmaßnahmen darstellen, sind die bestehenden Modelle mit verschiedenen Schwierigkeiten bei der Modellierung behaftet und mit Mängeln bezüglich der verwendeten Daten und Methodik verbunden. Eine Schwierigkeit liegt in der Auswahl eines geeigneten Modells für eine gegebene Fragestellung. Üblicherweise wird ein neues Modell für ein einzelnes Land und zu bestimmten Zwecken wie z.B. zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, der Beurteilung der Auswirkungen von Energieeinspargesetzen oder der Bestimmung kurz- oder langfristiger Entwicklungen des Endenergiebedarfs entwickelt. Dies trägt erheblich zur Erweiterung der Erkenntnisse zur Modellierung bei, aber ebenfalls zur Erhöhung der Vielfalt und Anzahl an bestehenden Modellen. Damit wird allerdings auch gleichzeitig die Auswahl eines geeigneten

---

<sup>1</sup>Der Unterschied zwischen Energieverbrauch und Energiebedarf, unterteilt in verschiedene Umwandlungsebenen (Primärenergie, Sekundärenergie, Endenergie, Nutzenergie) wird im Anhang A, Abschnitt A.1 erklärt.

Modells erschwert, wenn ein anderes Land untersucht werden soll, oder wenn die genaue Ausrichtung der Studie anders ist, als im Modell vorgesehen. Es fehlen objektive Analyseparameter und Bewertungskriterien, welche die Auswahl eines geeigneten Modells für einen bestimmten Zweck vereinfachen können. Zwar haben Kavgic et al. [28] im Jahr 2010 eine detaillierte Beschreibung mit einer Analyse der Vor- und Nachteile von neun Modellen für den Wohnungssektor (BREHOMES, CREEM, REM, DECarb, CDEM, A Bottom-up Engineering Estimate of the Aggregate Heating and Cooling Loads for the Entire U.S. Building Stock, Software package VerbCO<sub>2</sub>M, Johnston's Model und UKDCM) durchgeführt, allerdings beinhaltet diese Studie keine Überprüfung der Prognosegenauigkeit der Modelle, die zur Auswahl eines geeigneten Modells für eine konkrete Fragestellung beitragen kann. Ebenso wenig wurde bisher die Übertragbarkeit der Modelle analysiert, obwohl dies von einigen Autoren als eine wichtige Untersuchung betrachtet wurde [22, 57]. Als Übertragbarkeit der Modelle wird hierbei in der vorliegenden Arbeit die Fähigkeit der Modelle verstanden, den Endenergiebedarf von verschiedenen Ländern zu modellieren.

Eine andere Schwierigkeit in der Entwicklung einer Modellierung liegt in der Datenerhebung [16]. Prognosemodelle mit einem hohen Detaillierungsgrad benötigen große Datenmengen, die nicht immer verfügbar sind [58]. Dagegen benötigen Modelle mit einem niedrigen Detaillierungsgrad nur geringere Datenmengen. Allerdings ist die Möglichkeit zur Evaluation von spezifischen Energieeinsparmaßnahmen wie z.B. die Verringerung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Wände oder die Nutzung von Energieeinsparlampen mit Schwierigkeiten verbunden, da Modelle mit einem niedrigen Detaillierungsgrad detaillierte Informationen der Eingangsparameter nicht berücksichtigen können. Darüber hinaus unterstreicht dieses Problem die Notwendigkeit einer Zusammenstellung wichtiger Parameter, welche zum einen die Datenerhebung erleichtern und zum anderen die Möglichkeit zur Evaluation von spezifischen Energieeinsparmaßnahmen gewährleisten kann. In diesem Zusammenhang kommt einer Kategorisierung der Eingangsparameter entsprechend des Einflussgrades auf die Ausgangsparameter (Endenergieverbrauch) eine besondere Bedeutung zu.

Quantifizierungen der Unsicherheiten<sup>2</sup> der bestehenden Modelle für die Modellierung des Endenergieverbrauchs beziehungsweise Endenergiebedarfs im Wohnungssektor fehlen in der Regel [28, 59, 60]. Darüber hinaus verwenden die bestehenden Modelle oft Eingangsparameter, die bereits mit Unsicherheiten verbunden sind [61]. Dieses führt unvermeidlich zu einer Unsicherheit in den Ergebnissen. Nach Kavgic et al. [28] und Booth et al. [59]

---

<sup>2</sup>Unsicherheit: stochastische Variabilität der Ausgangsparameter eines Modells in Abhängigkeit der spezifischen Eingangsparameter

müssen derzeitige Mängel, die sich aus der oft fehlenden Quantifizierung der inhärenten Unsicherheiten, sowie aus der fehlenden Transparenz der Modelle ergeben, gelöst werden, da ohne eine rigorose Überprüfung der Modelle die Ergebnisse der Modellierung nicht zuverlässig sind. Um die Zuverlässigkeit zu steigern, werden vielfach lokale Sensitivitätsanalysen durchgeführt, mit deren Hilfe der Einfluss der einzelnen Eingangsparameter auf die Ausgangsgrößen bestimmt werden kann [24, 26, 27, 62]. Allerdings ist eine lokale Sensitivitätsanalyse zur Identifizierung der Unsicherheiten aufgrund der Interaktion von Eingangsparametern oder der Kombination von Ergebnissen, die sich aus der inhärenten Unsicherheit der Eingangsparameter ergeben, unzureichend [63]. Dieses Problem wird aufgrund des Mangels an einer Eingangsparameterkategorisierung verstärkt, da die Unkenntnis über die Auswirkung eines jeden Eingangsparameters auf die Ergebnisse die Gesamtunsicherheit der Modellierung erhöht. Diese Voraussetzungen können in letzter Konsequenz daher zur Entwicklung von unzureichenden Energieeinsparmaßnahmen führen.

Die aufgeführten Mängel und Beschränkungen in der Anwendbarkeit der aktuellen Modelle für den Wohnungssektor belegen, dass eine Weiterentwicklung dieser Modelle notwendig ist, um genauere Prognosen zum Endenergiebedarf und zur Entwicklung von geeigneten Energieeinsparmaßnahmen treffen zu können.

## 1.2 Zielsetzung und Herangehensweise

Eines der grundlegenden Ziele dieser Forschungsarbeit ist die Analyse der Funktionsfähigkeit bereits bestehender Modelle zur Berechnung des Endenergiebedarfs, inklusive ihrer Stärken und Schwächen. Der Fokus liegt hierbei, wie bereits in der einleitenden Problemstellung verdeutlicht, auf dem Wohnungssektor.

Die Modelle werden sowohl auf ihre Übertragbarkeit und Genauigkeit der Berechnungsmethoden zur Bestimmung des Endenergieverbrauchs als auch im Hinblick auf ihre methodischen Ansätze zur Prognose des Endenergiebedarfs analysiert. Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Modelle werden zwei Kriterien verwendet:

- die Verfügbarkeit der zur Modellierung notwendigen Daten,
- die Anpassungs- bzw. Modifizierungsflexibilität der Algorithmen.

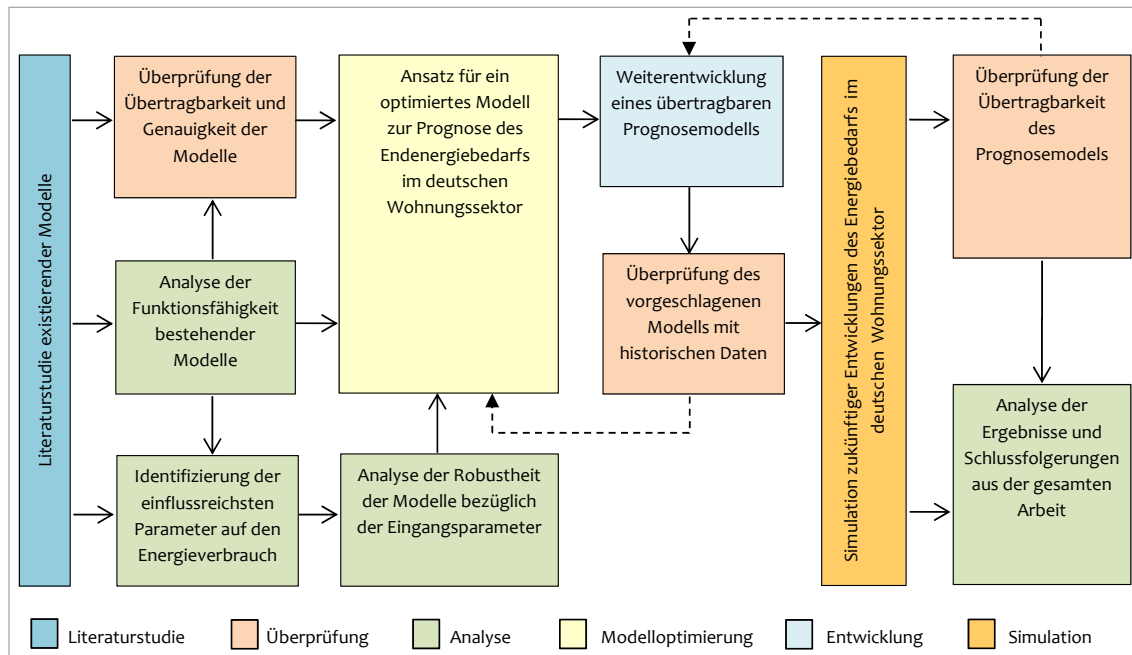
Die Genauigkeitsüberprüfung der Modelle wird mit statistischen Parametern vorgenommen: relativer Abweichungsfehler, Mittelwert der prozentualen Differenz, Korrelationskoeffizient  $r$  und Bestimmtheitsmaß  $r^2$ . Es werden zwei Zeiträume betrachtet:

- ein „Referenzzeitraum“ von 1990 bis 2000 und
- ein „Prognosezeitraum“ von 2001 bis 2010.

Die Auswahl dieser zwei Zeiträume hat den Vorteil, dass für beide statistische Daten vorliegen, so dass sowohl die Fähigkeit der Modelle, den „aktuellen“ Endenergieverbrauch im Wohnungssektor zu bestimmen als auch den „zukünftigen“ Endenergiebedarf zu prognostizieren, untersucht werden kann. Alle Modellierungen können hierbei statistische Daten aus dem „Referenzzeitraum“ verwenden, um den Endenergieverbrauch zu ermitteln, während im „Prognosezeitraum“ die Berechnungsmethoden des jeweiligen Modells verwendet werden, um den Endenergiebedarf zu prognostizieren. Die Ergebnisse für beide Zeiträume werden mit den vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) [64] bereitgestellten Daten zum Endenergieverbrauch verglichen. Außerdem wird untersucht, inwieweit Anpassungen oder Veränderungen in den bestehenden Modellen notwendig sind, um verbesserte Prognosen für den deutschen Wohnungssektor zu erhalten.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit besteht darin, für die Eingangsparameter und Berechnungsmethoden bestehender Modelle eine Methode zur Wichtung ihres Einflusses auf den Endenergieverbrauch zu entwickeln, um die maßgeblichen Eingangsparameter bestimmen zu können. Hierbei werden die Bedeutung der kombinierten Unsicherheiten der Eingangsparameter sowie deren Einfluss auf die Ergebnisse der Modellierung und die Zuverlässigkeit der Schlussfolgerungen mit Hilfe einer globalen Sensitivitätsanalyse und einer Monte-Carlo-Simulation analysiert. Diese Analyse hat den Zweck, die Unsicherheiten der bestehenden Modelle zu quantifizieren, was bereits vielfach als notwendige Verbesserung in der Modellentwicklung betrachtet wurde [28, 59-61].

Dementsprechend ist ein wichtiges Ziel dieser Forschungsarbeit, auf Basis der oben genannten Analysen bestehende Modellierungsansätze zu einem optimierten Prognosemodell weiterzuentwickeln, welches die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor abbildet und eine verbesserte Endenergiebedarfsprognose liefert. Dieses Modell soll die Stärken bestehender Modelle integrieren und alle im Rahmen dieser Arbeit als wichtig ermittelten Parameter, bezogen auf den Endenergieverbrauch, berücksichtigen. Mit Hilfe dieses optimierten Prognosemodells soll die Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor separat nach den einzelnen Nutzungsbereichen (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung) für die nächsten fünfzehn Jahre gezeigt werden (bis 2030). Dies erlaubt einen Vergleich mit Prognosen des zukünftigen Endenergiebedarfs anderer Autoren [65-67], welche für diesen Zeitrahmen Prognosen für den deutschen Wohnungssektor erstellt haben. Es wird zudem möglich, aktuelle staatliche Förderprogramme und Verordnungen, wie die Energieeinsparverordnung [68], bezüg-



**Abb. 1.1:** Schematische Darstellung der Forschungsschritte (durchgezogene Linien) und der Kalibrierung (gestrichelte Linien) des verbesserten Prognosemodells

lich der erreichbaren Reduzierung des Endenergieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu evaluieren, indem deren Auswirkungen auf die Modelleingangsparameter mit berücksichtigt werden. Weiterhin soll ermittelt werden, wie die Übertragbarkeit des verbesserten Prognosemodells auf andere Länder gewährleistet werden kann und welche länderspezifischen Modifikationen gegebenenfalls notwendig sind. Aus diesem Grund müssen neben dem Einfluss einzelner Parameter auch allgemeingültige Zusammenhänge innerhalb der bestehenden Modelle analysiert und ausgewertet werden. Die Überprüfung des verbesserten Modells soll am Beispiel von Chile und dem Vereinigten Königreich (UK) durchgeführt werden, da die sozialen, klimatischen, technischen und/oder ökonomischen Rahmenbedingungen in diesen Ländern zumindest in Teilen Unterschiede im Vergleich zu Deutschland aufweisen. Somit bestehen unterschiedliche Eingangsvoraussetzungen für die Modellierung.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit sollen insgesamt einen Beitrag zur Weiterentwicklung von Prognosemodellen leisten. Dies soll auf Grundlage der Erkenntnisse zur Bewertung der Übertragbarkeit, Genauigkeit und Unsicherheit bestehender Modelle sowie der Bestimmung der einflussreichsten Parameter auf den Endenergieverbrauch im Wohnungsbereich erfolgen. Die wesentlichen Arbeitsschritte zum Erreichen der obengenannten Ziele sind in Abb. 1.1 dargestellt.



## 2 Energieverbrauch

Die Nutzung von Energie spielte in allen Entwicklungsabschnitten der menschlichen Zivilisation eine wesentliche Rolle [69]. Je höher die Entwicklungsstufe<sup>3</sup> war, desto größer war auch der Bedarf an Energie [64, 70]. Dies spiegelt sich bis heute darin wieder, da es einen wesentlich höheren Energieverbrauch pro Kopf in den Industrieländern als in den Entwicklungsländern gibt [71, 72]. Diese bestehende Asymmetrie erfordert eine länderspezifische Analyse des Energieverbrauchs und der Prognose des Energiebedarfs, insbesondere, wenn die Charakteristik verschiedener Länder bezüglich der Ressourcenverfügbarkeit, der Energiepolitik, der Energiepreise, des Klimas und der Demographie betrachtet werden [70]. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel nicht nur die globalen Faktoren des Energieverbrauchs, sondern auch spezifische Energiekenndaten für Entwicklungs- und Industrieländer analysiert und verglichen. Hierbei erfährt insbesondere die Entwicklung des Energieverbrauchs in Deutschland eine detaillierte Betrachtung, da der deutsche Wohnungssektor in der vorliegenden Arbeit als Fallstudie betrachtet wird.

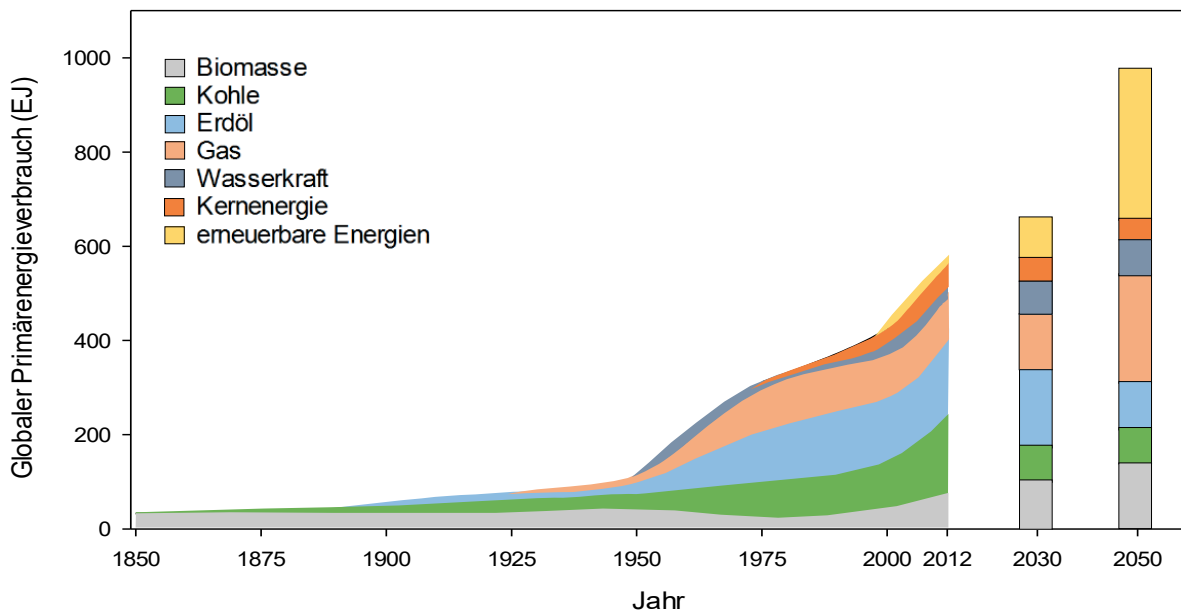
### 2.1 Globaler Energieverbrauch

Der weltweite Gesamtprimärenergieverbrauch ist in den letzten 160 Jahren zusammengefasst über alle Sektoren (Industrie, Wohnen, Gewerbe/Handel und Dienstleistung (GHD), Verkehr, Landwirtschaft) um das 18fache gestiegen [70]. Ein besonders deutlicher Anstieg zeichnete sich dabei in den Jahren 1950 bis 1980 ab (Abb. 2.1), was hauptsächlich auf die starke Zunahme der Weltbevölkerung (von 2,5 Mrd. Personen im Jahr 1950 auf 6,9 Mrd. Personen im Jahr 2010 [73]) und das Wirtschaftswachstum der europäischen und nordamerikanischen Länder zurückzuführen ist [74]. Ein weiterer klar erkennbarer Anstieg des Gesamtprimärenergieverbrauchs ist ab 1990 zu verzeichnen, welcher im Wesentlichen durch die Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung in Asien verursacht wurde [70]. Allein in den letzten zwei Jahrzehnten wies der Gesamtprimärenergieverbrauch eine durchschnittliche jährliche Steigerung von rund 2% auf [75]. Derzeit beträgt er etwa 560 EJ pro Jahr [52]. Für die nächsten Jahre ist eine weitere Erhöhung aufgrund des Wachstums der Weltbevölkerung und der wachsenden wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit weltweit zu erwarten (im Jahr 2050 auf ca. 918 EJ) [53, 54, 70, 76-78].

In Abb. 2.1 ist weiterhin zu sehen, dass die globale Energiematrix in den vergangenen Jahrzehnten hauptsächlich aus fossilen Energieträgern bestand. Auch zum heutigen Zeitpunkt

---

<sup>3</sup>Phasen der Entwicklung sozialer und materieller Lebensbedingungen aufgrund des wissenschaftlichen und technischen Fortschritts.



**Abb. 2.1:** Langfristige Entwicklung des globalen Primärenergieverbrauchs und Prognose der IEA des zukünftigen Primärenergiebedarfs nach Energiequelle [70, 77]

wird die globale Energiematrix zu über 80% durch den Einsatz von fossilen Energieträgern gedeckt [79].

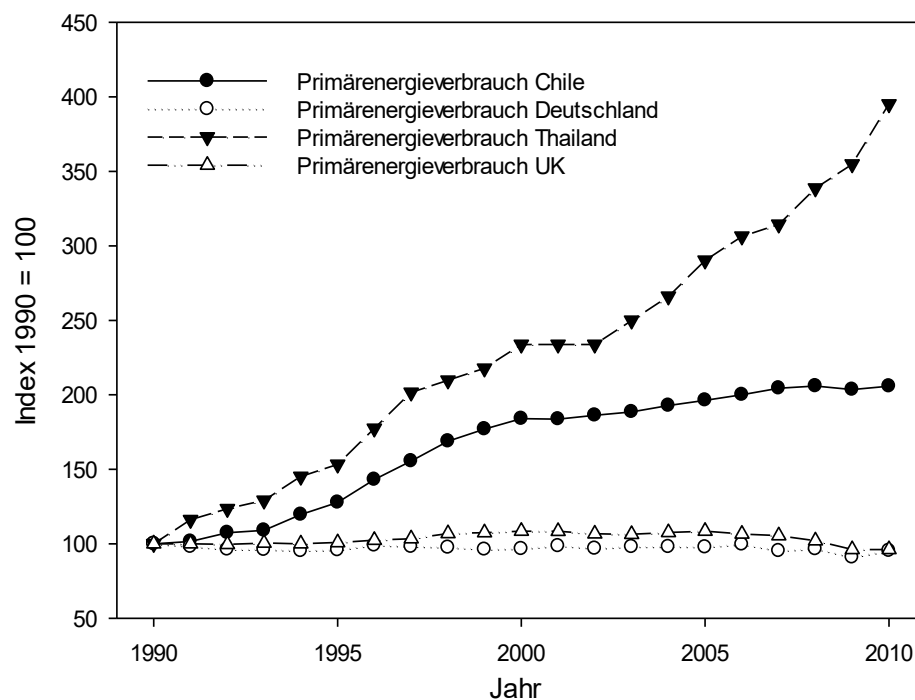
Die Nutzung von fossilen Energieträgern ist jedoch mit zwei Problemen verbunden: Zum einen führt die Verbrennung fossiler Energieträger zur Freisetzung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche als Hauptursache der globalen Erwärmung identifiziert wurden [80-82] und zum anderen sind der zukünftigen Energieversorgung in ihrer bisherigen Form, aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von fossilen Energieressourcen, Grenzen gesetzt [83]. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich, dass die Entwicklung von Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Nutzung von erneuerbaren Energien ein zunehmendes Interesse in verschiedenen Bereichen der Gesellschaft (Internationale Regierungsorganisationen, Privatwirtschaft, Zivilgesellschaft) erlangt hat [84].

Angesichts des wachsenden Interesses an Energieeinsparmaßnahmen, nicht zuletzt auch aufgrund der zu erwartenden Konsequenzen des Klimawandels, werden global verschiedene Maßnahmen und Strategien zur Realisierung von Energieeinsparpotenzialen und zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen forciert (z.B. die Nutzung von erneuerbaren Energiequellen, die Förderung einer nachhaltigen Landwirtschaft, die Verbesserung der Wärmedämmung von Gebäuden oder die Entwicklung von effizienter Heiz- und Klimatechnik) und in entsprechenden internationalen Vereinbarungen festgeschrieben oder in nationale oder europäische Gesetze und Richtlinien integriert [85-89]. Weiterhin besteht sowohl in In-



dustrielländern als auch in Entwicklungsländern ein Trend zu einem wachsenden Einsatz von erneuerbaren Energien zur Energiebedarfsdeckung [64, 70, 71, 77, 90, 91]. In diesem Zusammenhang werden Modelle zur Quantifizierung dieser Potentiale zunehmend wichtiger.

Die Abb. 2.2 zeigt exemplarisch für die beiden Schwellenländer Thailand (THA) und Chile (CL) sowie für die beiden Industrieländer Deutschland (DE) und das Vereinigte Königreich (UK) die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Vergleich zum Basisjahr 1990. Es ist zu sehen, dass Thailand und Chile eine steigende Tendenz im Primärenergieverbrauch aufweisen, was in direktem Zusammenhang mit dem Wirtschaftswachstum in beiden Ländern steht [95, 96]. Dagegen wird bei den Industrieländern (DE und UK) eine Stagnation des Primärenergieverbrauchs beobachtet. Nachfolgend werden die spezifischen Ursachen für diese Entwicklung in den vier ausgewählten Ländern dargestellt.



**Abb. 2.2:** Vergleich der Entwicklung des langfristigen Primärenergieverbrauchs (Basisjahr 1990=100) von zwei Schwellenländern (Thailand und Chile) und zwei Industrieländern (Deutschland und UK). Statistische Daten für Thailand, Chile, Deutschland und UK: [64, 71, 90, 91]

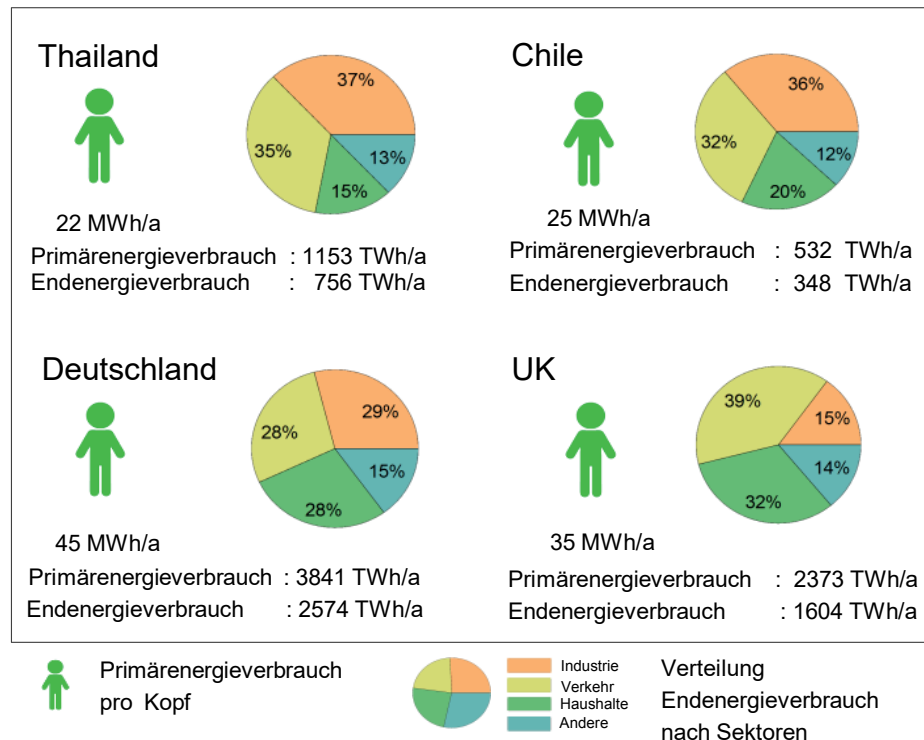
Thailand erreichte in den Jahren von 1981 bis 2004 eine durchschnittliche jährliche Wirtschaftswachstumsrate von 6,1%. Infolgedessen ist auch für den Primärenergieverbrauch eine positive jährliche Wachstumsrate (bis zu 5,4%) zu verzeichnen [96]. Die Sektoren,

welche in direkter Weise mit dem Wirtschaftswachstum in Verbindung stehen – in Thailand sind dies Industrie und Landwirtschaft – weisen eine jährliche Wachstumsrate im Endenergieverbrauch von mehr als 3,2% auf [96]. Ein weiterer Grund für den steigenden Endenergieverbrauch in Thailand ist der Wohnungssektor mit einer jährlichen Wachstumsrate von 3,4%. Für den Wohnungssektor wird aufgrund der Zunahme der Bevölkerung und des verbesserten Lebensstandards eine weitere Erhöhung des Endenergiebedarfs erwartet. Prognostiziert wird hierbei, dass er im Jahr 2050 etwa das 5-fache des Wertes von 2005 betragen wird [97, 98].

In Chile sind die große Zunahme der Bevölkerung (von 1990 bis 2010 um etwa 30%) [99], verbunden mit einem starken Wirtschaftswachstum, die hauptsächlichen Faktoren für die Steigerung im Primärenergieverbrauchs [100]. Zusätzlich dazu ist die erhebliche Steigerung des Energieverbrauchs insbesondere auf die Intensivierung der Bergbauindustrie zurückzuführen [100]. Für Chile ist außerdem anzumerken, dass in den letzten Jahren für alle Sektoren (Industrie, Wohnen, Gewerbe, Verkehr, Landwirtschaft) die Energieeinsparpotenziale quantifiziert wurden [101]. Eine Vielzahl von Energieeinsparmaßnahmen, wie z.B. die Nutzung von energieeffizienten Fahrzeugen, die Verwendung von Energiesparlampen im Rahmen des „Landesprogrammes zur Energieeffizienz“ (Programa Pais de Eficiencia Energética) [102] und die Wärmedämmung von Gebäuden durch die Anwendung der „Verordnung für thermische Anforderungen in Gebäuden“ (Reglamentación Térmica de Edificios [103]) werden bereits seit 2007 umgesetzt [104, 105]. Dies lässt sich in Abb. 2.2 ablesen, da der Primärenergieverbrauch in den letzten Jahren vor 2010 stagniert hat.

In Deutschland wird seit dem Einsatz von Maßnahmen im Rahmen einer konsolidierten, aktiven Energieeffizienzpolitik, wie z.B. der Erfüllung des Kyoto-Protokolls [87], den 20-20-20-Zielen [89] und des Energiekonzeptes 2010 [106, 107], ein leichter Rückgang des Primärenergieverbrauchs beobachtet. In den späten 1990er Jahren war hingegen noch ein geringer Anstieg des Primärenergieverbrauchs zu verzeichnen (siehe Abb. 2.2). Einfluss darauf hatten unter anderem Faktoren, wie das Wirtschaftswachstum und die Konsumsteigerung, die einen Rückgang im Primärenergieverbrauch verhindert haben [108]. In den Jahren 2000 bis 2006 gab es einen stagnierenden Energieverbrauch und erst seit 2007 kann eine leicht sinkende Tendenz der Entwicklung des Energieverbrauchs in Deutschland beobachtet werden [64].

Der Primärenergieverbrauch im Vereinigten Königreich ist seit 2005 rückläufig und derzeit auf ein ähnliches Niveau wie Mitte der 1980er Jahre gesunken. Dies erklärt sich zum



**Abb. 2.3:** Vergleich der Energiekennzahlen von Thailand (2012), Chile, Deutschland und UK (2013). Daten zur Verteilung und Menge des Primär- und Endenergieverbrauchs abgeleitet aus Datenquellen: [64, 71, 90, 92, 93]. Der Sektor „Andere“ beinhaltet die Sektoren: Landwirtschaft, Gewerbe/Handel und Dienstleistung. Daten zum Primärenergieverbrauch pro Kopf bezogen auf Bevölkerungsdaten von 2012/2013, abgeleitet aus Datenquelle: [94]

einen durch eine Reduktion des Energieverbrauchs im Industriesektor, aber im Wesentlichen durch die starke Verringerung im Wohnungssektor aufgrund der Verbesserung der Energieeffizienz von Wohngebäuden [71, 109]. Außerdem spielen auch Klimafaktoren eine Rolle, da höhere durchschnittliche Temperaturen in den letzten Jahren zu einer Reduktion des Gasverbrauchs für Raumwärme führten [109].

In Abb. 2.3 werden weitere Unterschiede zwischen den untersuchten Schwellen- und Industrieländern im Primärenergieverbrauch pro Kopf, dem gesamten Primär- und Endenergieverbrauch und der Verteilung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren deutlich.

Am Beispiel der vier ausgewählten Länder kann festgestellt werden, dass der Primärenergieverbrauch pro Kopf für die Industrieländer DE und UK gegenüber den Schwellenländern THA und CL wesentlich höher ist (um etwa 40%). Ähnliche Aussagen wurden von Wagner (58%) [110] und Oesterwind (50%) [111] für ausgewählte Industrie- und

Schwellenländer (u.a. Singapur, Kanada, USA, Deutschland, Indien, Philippinen, UK) getroffen. Laut Wagner [110] ist dieser Unterschied noch größer (etwa 80%), wenn der Primärenergieverbrauch pro Kopf für Industrieländer im Vergleich zu Entwicklungsländern ermittelt wird. Trotzdem hat sich der Unterschied des Primärenergieverbrauchs pro Kopf zwischen Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern im Laufe der letzten fünfzig Jahre verringert [74, 94, 110, 111]. Diese Verringerung lässt sich, wie am Beispiel der vier ausgewählten Länder in Abb. 2.2 deutlich wird, hauptsächlich durch die Stagnation des Primärenergieverbrauchs in den Industrieländern bzw. dessen Zunahme in den Schwellenländern erklären. Das bedeutet, dass sich der Primärenergieverbrauch pro Kopf der Schwellenländer aufgrund der bisherigen Tendenz aller Voraussicht nach weiterhin dem der Industrieländer annähern wird. Diese Entwicklung hat für alle Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländer zusammen genommen insgesamt eine Zunahme des weltweiten Gesamtprimärenergieverbrauchs um ca.  $1,7 \text{ PWh/a}$  zur Folge [110, 112].

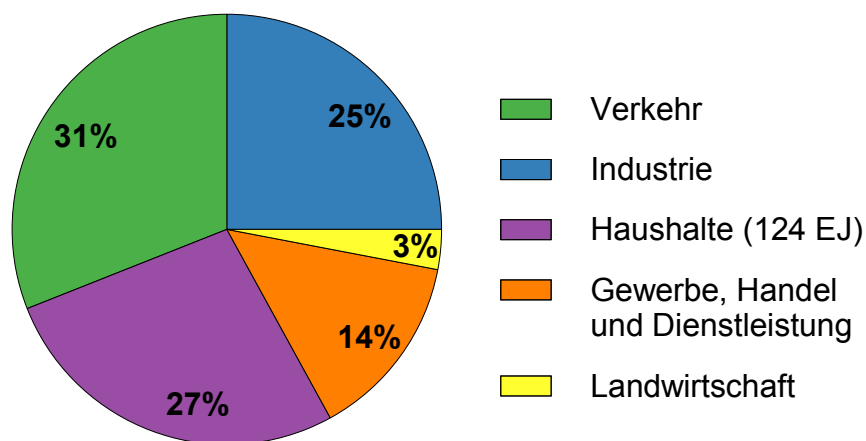
In Abb. 2.3 ist ebenfalls zu sehen, dass zwischen den vier ausgewählten Industrie- und Schwellenländern ein erheblicher Unterschied zwischen Primär- und Endenergieverbrauch besteht. Dieser Unterschied beträgt 32% für das Vereinigte Königreich, 33% für Deutschland, 34% für Thailand und 35% für Chile. Ähnlich stellt sich das Verhältnis zwischen dem weltweiten Primärenergieverbrauch und Endenergieverbrauch dar, da ersterer über alle Erzeugeranlagen betrachtet um mehr als 30% höher liegt [113]. Dies weist auf bedeutende Energieverluste innerhalb der Umwandlungsprozesse von der Primär- zur Endenergie hin, welche hauptsächlich in Kraftwerken/Wärmekraftkopplungsanlagen und -maschinen (thermische Verluste) und in den Übertragungs- und Verteilnetzen (Übertragungsverluste) auftreten [114]. Das bedeutet, dass neben einem Wechsel von fossilen Brennstoffen zu erneuerbaren Energieträgern auch noch Energieeinsparpotenziale in der Optimierung der Umwandlung von Primär- zu Endenergie zu verzeichnen sind.

Weiterhin zeigt Abb. 2.3, dass der Industriesektor in beiden Schwellenländern den größten Teil des Endenergieverbrauchs ausmacht. Dies erklärt sich durch den zunehmenden Endenergieverbrauch in den Produktionssektoren für Thailand und Chile, welche in direktem Verhältnis mit dem Wirtschaftswachstum stehen [78, 96, 99, 100]. Außerdem zeigt Abb. 2.3, dass der Anteil des Wohnungssektor am Gesamtendenergieverbrauch in den Industrieländern (UK, DE) höher als in den Schwellenländern ist. Dies erklärt sich nicht nur dadurch, dass die ausgewählten Industrieländer mehr Wohnungen (DE = 37 Mio. Wohnungen, UK = 27 Mio. Wohnungen) als die Schwellenländer (CL = 5 Mio. Wohnungen, THA = 20 Mio. Wohnungen) haben, sondern auch, weil der durchschnittliche Endenergieverbrauch in einer Wohnung im Vereinigte Königreich ( $23 \text{ MWh/a}$ ) und in Deutschland

(20 MWh/a) drei Mal höher als in Chile 7,6 MWh/a und Thailand 5,8 MWh/a ist [97, 115]. Das Klima spielt ebenfalls eine Rolle. Da Deutschland und das Vereinigte Königreich in einer deutlich kühleren klimatischen Zone im Vergleich zu Chile und Thailand liegen, benötigen die Wohnungen dort deutlich mehr Energie für Raumwärme als in Chile und Thailand [97].

## 2.2 Energieverbrauch im Wohnungssektor

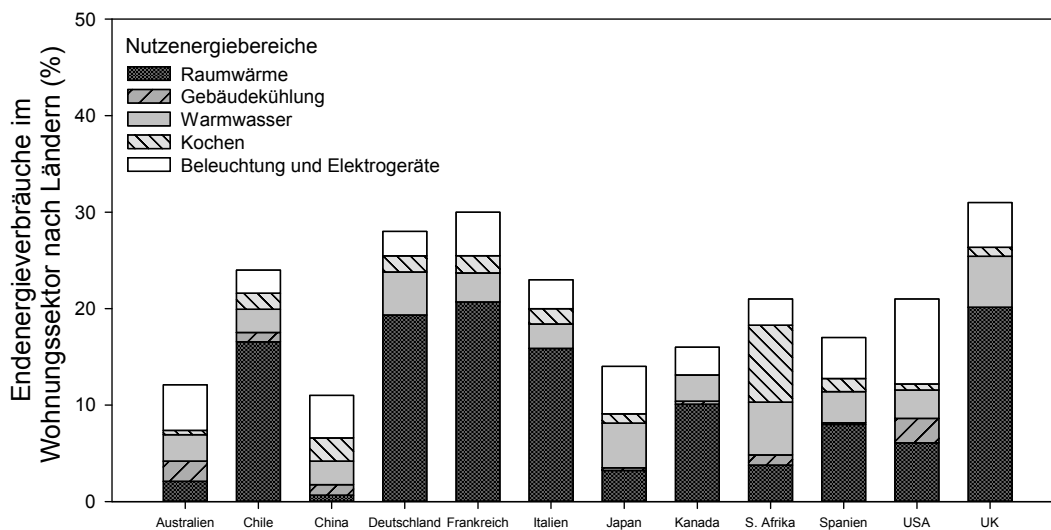
Auf den Wohnungssektor entfällt mehr als ein Viertel des weltweiten Endenergieverbrauchs (29%) [56], der außerdem im Laufe der letzten vier Jahrzehnte kontinuierlich mit einer durchschnittlichen jährlichen Rate von mehr als 2% gestiegen ist [116]. Innerhalb der Europäischen Union (EU) entfallen rund 27% des gesamten Endenergieverbrauchs auf den Wohnungssektor (Abb. 2.4) [55]. Es ist jedoch anzumerken, dass auf nationaler Ebene der Anteil des Endenergieverbrauchs in Abhängigkeit von den Bedingungen des jeweiligen Landes variiert und für ausgewählte Länder, wie beispielsweise Saudi Arabien, sogar bis zu 50% betragen kann [58, 117]. Dieser Unterschied wird in Abb. 2.5 am Beispiel von 12 ausgewählten Ländern dargestellt. Die teilweise bedeutenden Unterschiede liegen insbesondere am jeweiligen Klima, aber auch an wirtschaftlichen Gegebenheiten, wie Lebensstandard und Ausstattung der Häuser mit technischen Anlagen/Geräten [118].



**Abb. 2.4:** Verteilung des Endenergieverbrauchs in der Europäischen Union (EU) nach verschiedenen Sektoren (Bezugsjahr 2013, Datenquelle: [55])

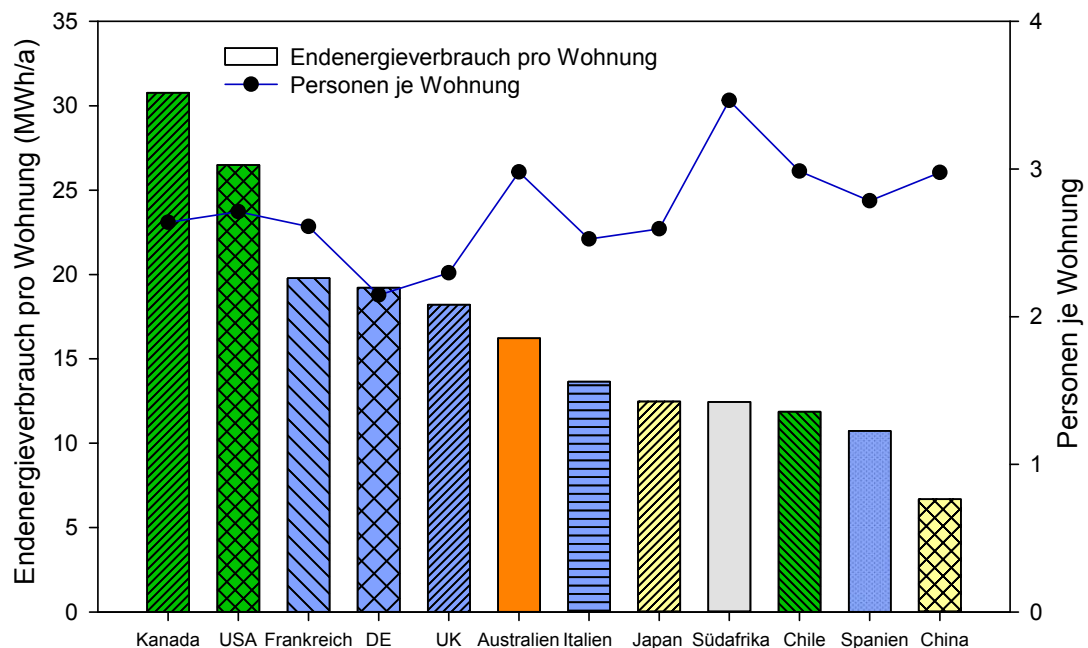
Abb. 2.5 zeigt weiter, dass der Anteil des Wohnungssektors am nationalen Endenergieverbrauch für die 12 betrachteten Länder zwischen 12% (China) und 31% (UK) variiert. Hierbei ist anzumerken, dass der Endenergieverbrauch für Raumwärme die im Vergleich größte Standardabweichung hat, während in den anderen Nutzenergiebereichen geringere

Standardabweichungen vorliegen. Der Endenergieverbrauch für „Warmwasser“ beträgt im Durchschnitt 18% des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor mit einer Standardabweichung von 7%, während die Nutzung von Energie im Bereich „Beleuchtung und Elektrogeräte“ im Durchschnitt 22% des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor mit einer Standardabweichung von 12% aufweist. Dagegen entfallen auf die Nutzung von Energie für „Raumwärme“ im Durchschnitt 45% des Endenergieverbrauchs mit einer Standardabweichung von 25%.



**Abb. 2.5:** Anteil des Wohnungssektors am nationalen Endenergieverbrauch und dessen Zusammensetzung nach Nutzenergie. Datenquellen: [64, 119-129]. Anmerkungen: Bezugsjahr 2013 für UK, Deutschland, USA und Australien; 2011 für Italien und Spanien; 2010 für Kanada; 2009 für Südafrika und Frankreich und 2008 für Chile und China. In Kanada wurde „Kochen“ unter dem Begriff „Beleuchtung und Elektrogeräte“, betrachtet; für Frankreich, Deutschland, Italien und UK wurde „Gebäudekühlung“ unter dem Begriff „Beleuchtung und Elektrogeräte“ betrachtet.

Der höchste absolute Endenergieverbrauch im Wohnungssektor für die zwölf ausgewählten Länder in Abb. 2.5 entfällt auf die USA (3093 TWh/a), gefolgt von China (3045 TWh/a). Die Länder mit dem niedrigsten absoluten Endenergieverbrauch sind Australien (126 TWh/a) und Chile (70 TWh/a). In diesen Fällen steht die Höhe des Endenergieverbrauchs in direktem Zusammenhang mit der Anzahl der Wohnungen bzw. der Anzahl der Einwohner der einzelnen Länder. So benötigen die USA mit 116 Mio. Wohnungen und 316 Mio. Einwohnern das 40-fache der Energie Chiles mit 6 Mio. Wohnungen und 17 Mio. Einwohnern.

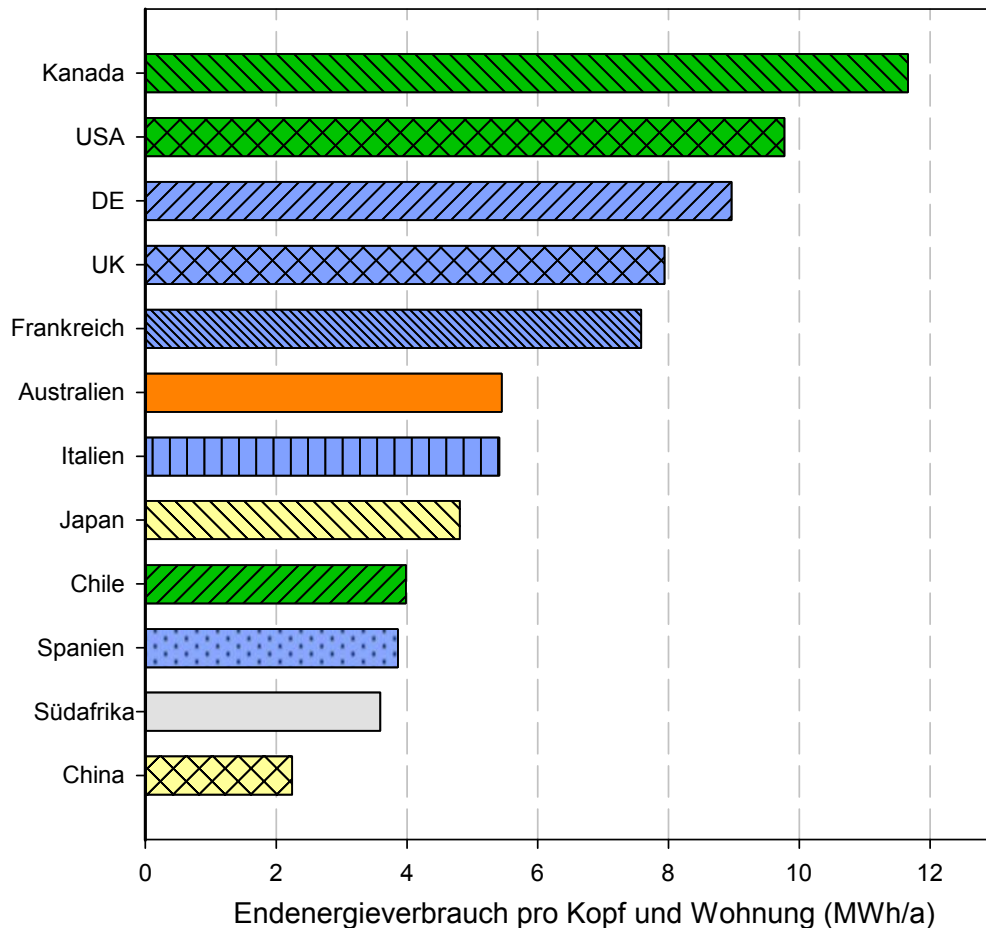


**Abb. 2.6:** Vergleich des durchschnittlichen Endenergieverbrauchs pro Wohnung für zwölf ausgewählte Länder. Datenquellen: Daten des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor abgeleitet aus Datenquellen: [64, 119, 120, 127, 129-131]. Daten der Anzahl der Wohnungen abgeleitet aus Datenquellen: [23, 33, 131-140]. Daten der Anzahl der Einwohner abgeleitet aus Datenquelle: [141]

Um die Daten in Relation zu setzen, zeigt Abb. 2.6 einen Vergleich des durchschnittlichen Endenergieverbrauchs pro Wohnung für die zwölf ausgewählten Länder in absteigender Reihenfolge. Es ist zu sehen, dass die kanadischen und US-amerikanischen Wohnungen mit 30,8 MWh/a bzw. 26,5 MWh/a im Durchschnitt mehr Endenergie pro Wohnung benötigen als die spanischen und chinesischen Wohnungen mit 10,8 MWh/a bzw. 6,7 MWh/a im Wohnungsdurchschnitt. Außerdem zeigt Abb. 2.6, dass Länder mit ähnlichen Lebensverhältnissen und Klimabedingungen einen ähnlichen Endenergieverbrauch im Wohnungssektor aufweisen (z.B. Frankreich, Deutschland und UK oder Chile und Spanien).

Abb. 2.7 zeigt, dass die Reihenfolge des durchschnittlichen Endenergieverbrauches pro Kopf sich geringfügig von den gezeigten Ergebnissen in Abb. 2.6 unterscheidet. Dieser Unterschied erklärt sich durch die der Anzahl der Personen (Per) pro Wohnung (WE). So ist zum Beispiel zu sehen, dass der Endenergieverbrauch pro Kopf in Südafrika niedriger ist, da die Anzahl der Personen pro Wohnungen höher ist (3,5 Per/WE) als in den anderen Ländern (Abb. 2.7). Dagegen wird in Deutschland ein höherer Endenergieverbrauch pro Kopf aufgrund der niedrigen Anzahl der Personen pro Wohnung beobachtet (2,1 Per/WE). Dies zeigt, dass dieser Sozialfaktor (Personen pro Wohnung) eine wichtige Rolle für den

Verbrauch von Energie im Wohnungssektor spielt, da er einen bedeutenden Einfluss auf den Energieverbrauch pro Wohnung hat. Dieser Parameter ist jedoch nicht einfach durch Gesetze für Energieeinsparmaßnahmen regulierbar.



**Abb. 2.7:** Vergleich des durchschnittlichen Endenergieverbrauchs pro Kopf und Wohnung. Datenquellen: Daten des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor abgeleitet aus Datenquellen: [64, 119, 120, 127, 129-131]. Daten der Anzahl der Wohnungen abgeleitet aus Datenquellen: [23, 33, 131-140]. Daten der Anzahl der Einwohner abgeleitet aus Datenquelle: [141]

Derzeit stammt der Großteil der für den Wohnungssektor verwendeten Energie aus der Verbrennung fossiler Energieträger, so z.B. in Deutschland zu mehr als 89% [64]. Aus diesem Grund haben energieeinsparende Maßnahmen in diesem Sektor nicht nur ein großes Potenzial zur Senkung des Energieverbrauchs, sondern ebenfalls zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Energieeinsparungen im Wohnungssektor können daher einen Beitrag zum Erreichen von Klimaschutzzielen, wie z.B. den sogenannten „20-20-20-Zielen“ der EU beitragen [85, 86, 142], da neben einer Verringerung des Energieverbrauchs auch gleichzeitig



die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden. Die 20-20-20 Ziele der EU sehen eine Verringerung der Treibhausgasemissionen (THG) um 20% bis zum Jahr 2020 bezogen auf das Basisjahr 1990 vor, sowie eine Deckung des Endenergieverbrauchs durch erneuerbare Energien zu einem Anteil von 20% und eine Verbesserung der Energieeffizienz von 20% gegenüber den Prognosen des Jahres 2007 für das Jahr 2020 [85, 86, 142].

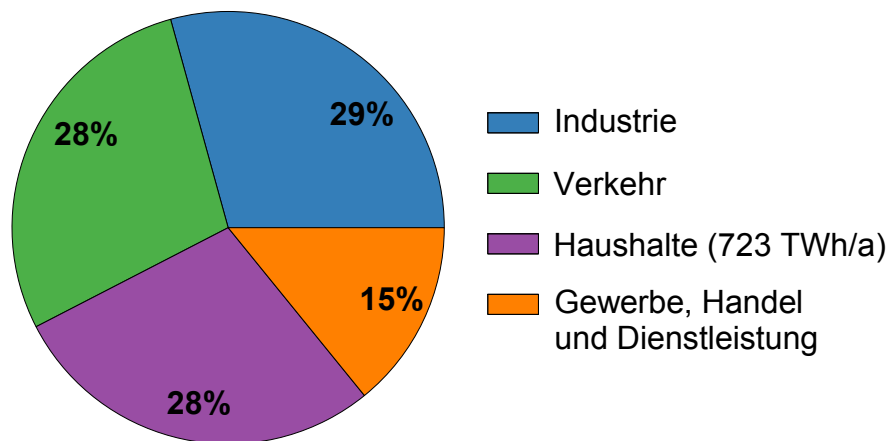
Der insgesamt hohe Anteil des Wohnungssektors am weltweiten Energieverbrauch und die Unterschiede im Anteil des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor am Gesamtenergieverbrauch verschiedener Länder sowie dessen vielfältige Zusammensetzung nach Nutzenergiebereichen (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung), erfordern spezifische Analysen bezüglich der Faktoren, welche die Ausprägung des Energieverbrauchs für jedes Land bestimmen. Im Folgenden wird daher der Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor einer näheren Betrachtung unterzogen, da diese Daten die Grundlage für die in dieser Arbeit vorgenommene Modellierung bilden.

### **2.3 Energieverbrauch im deutschen Wohnungssektor**

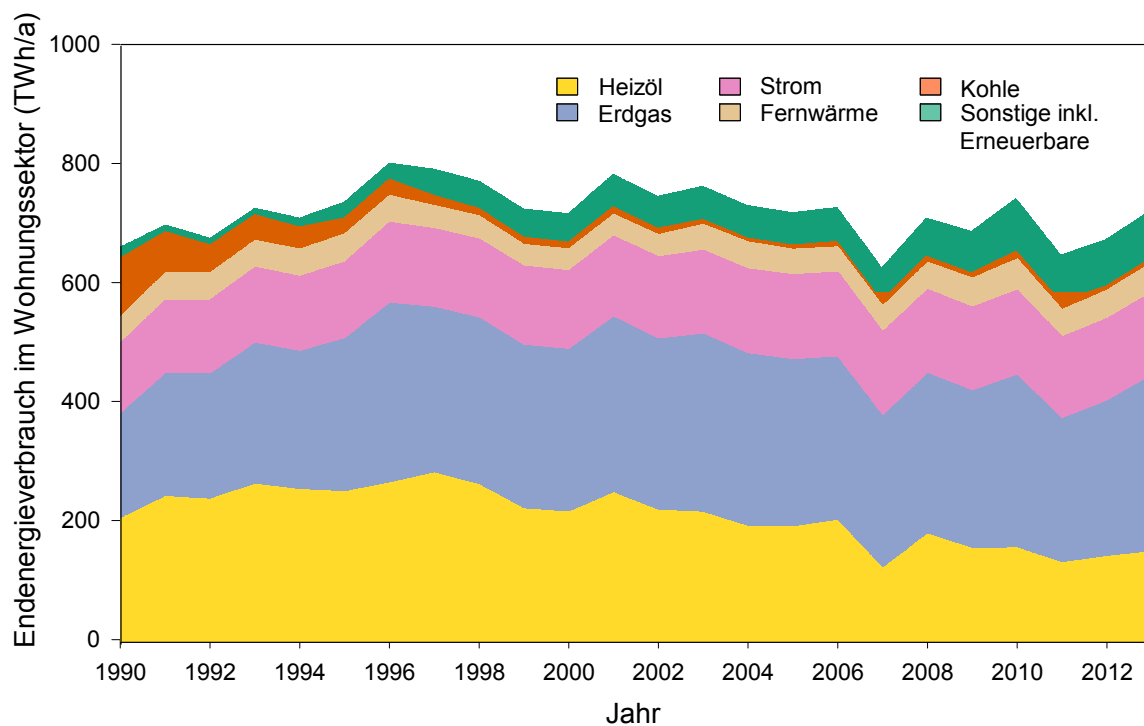
In Deutschland war der Wohnungssektor 2013, wie in Abb. 2.8 gezeigt, mit 28% am gesamten Endenergieverbrauch beteiligt [64]. Im Zeitraum zwischen 1990-2013 betrug der durchschnittliche Endenergieverbrauch im Wohnungssektor mehr als 721 TWh/a, wobei, wie aus Abb. 2.9 ersichtlich wird, hauptsächlich fossile Energieträger zur Energiebereitstellung verwendet wurden und zwar vor allem, um thermische Energie für die Raumwärme zu liefern.

Abb. 2.9 zeigt weiterhin, dass der Anteil an direkt genutzten erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor im Jahr 2013 nicht höher als 11% war. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass für die Stromerzeugung ebenfalls ein großer Anteil der Endenergie CO<sub>2</sub>-neutral durch erneuerbare Energien und Kernenergie bereitgestellt wurde. Dieser Anteil von CO<sub>2</sub>-neutraler Stromerzeugung ist von 31% im Jahr 1990 auf 39% im Jahr 2013 angestiegen, während der Anteil erneuerbarer Energien an der Fernwärmeversorgung im gesamten Zeitraum von 1990 bis 2013 gleichbleibend bei 4% lag [143-146]. Das bedeutet, dass der Anteil an CO<sub>2</sub>-neutral erzeugter Energie am Endenergieverbrauch im Wohnungssektor im Jahr 2013 insgesamt 19% betrug.

Wie eingangs bereits erwähnt, wird der größte Teil des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor (81% im Jahr 2013) nach wie vor durch fossile Energieträger gedeckt. Dies



**Abb. 2.8:** Verteilung des Endenergieverbrauchs in Deutschland nach verschiedenen Sektoren (Bezugsjahr 2013). Datenquelle: [64]



**Abb. 2.9:** Langfristige Entwicklung des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor nach Energiequelle. Datenquelle: [64]

impliziert, dass der Wohnungssektor für einen großen Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland verantwortlich ist. 2007 zum Beispiel lagen die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Energieverbrauch im Wohnungssektor bei 204 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>, was etwa ein Viertel (24%) der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland ausmachte [88]. Hierbei ist jedoch anzu-

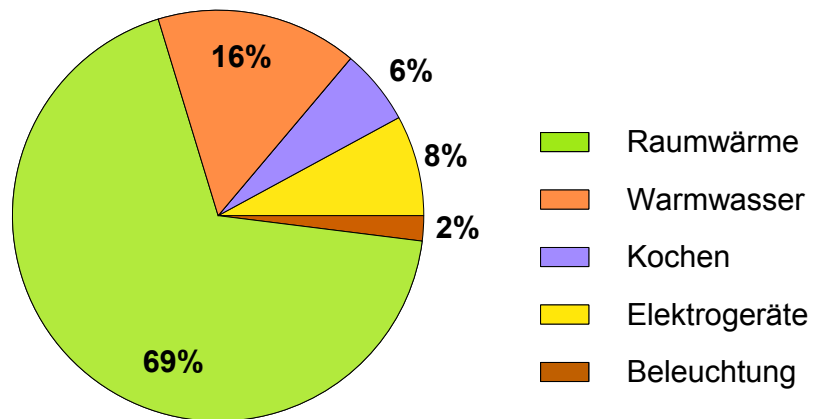
merken, dass es im Wohnungssektor in den letzten Jahren eine langsame Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund eines Wechsels der Energiequellen gab. So wurden Ölheizungen zunehmend durch Erdgasheizungen ersetzt, während gleichzeitig die Nutzung von Kohle zur Gewinnung von Raumwärme an Bedeutung verloren und die Nutzung von erneuerbaren Energien zur Bereitstellung von Raumwärme zugenommen hat. Ebenfalls hat der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung zugenommen, während der Anteil an Kernenergie rückläufig ist. Dies hat in den letzten zwei Jahrzehnten (1990-2013) im Elektrizitätssektor in Teilen zu einer Kompensation bezüglich der Freisetzung von CO<sub>2</sub>-Emissionen geführt [143, 144].

Im deutschen Wohnungssektor weist der Nutzungsbereich Raumwärme den größten Anteil am gesamten Endenergieverbrauch auf (Abb. 2.10). Zum Beispiel betrug im Jahr 2013 der Endenergieverbrauch für Raumwärme 499 TWh/a, was etwa 69% des gesamten Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor entsprach.

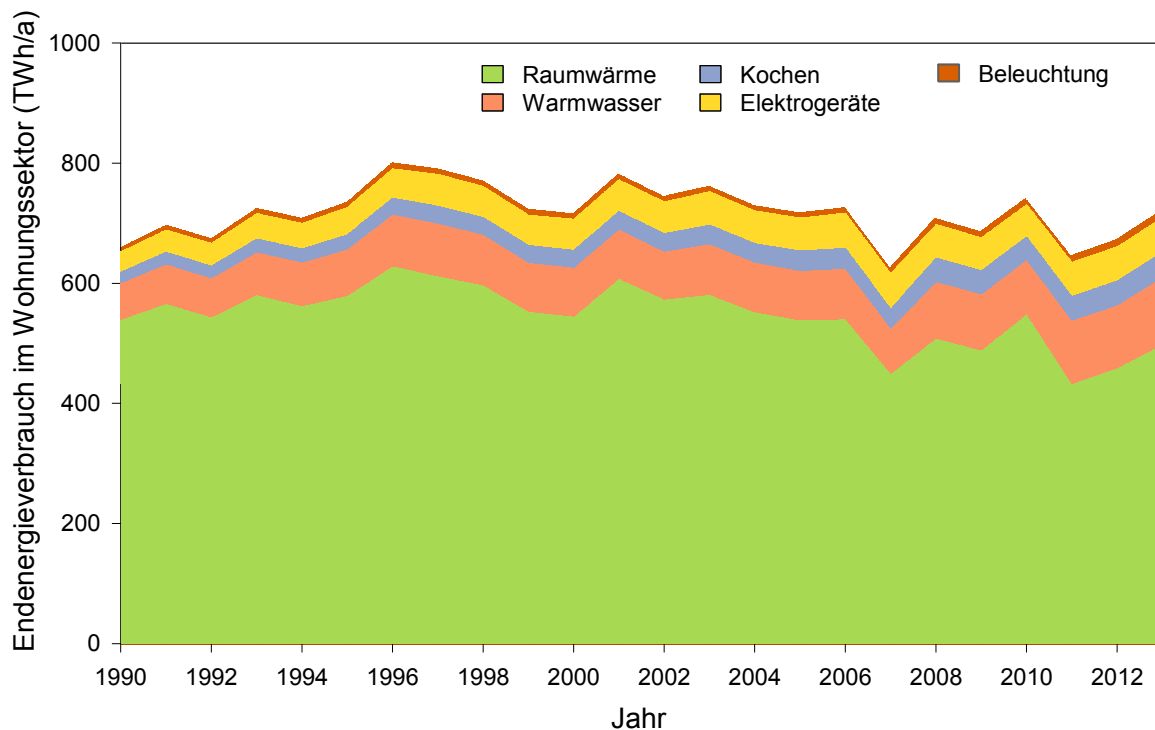
Abb. 2.11 zeigt die Unterteilung des Endenergieverbrauchs nach Nutzungsbereichen (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung). Jährliche Daten zur Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor nach Nutzungsbereichen werden vom BMWi erst seit 2008 publiziert. Daten für den für diese Arbeit relevanten Betrachtungszeitraum zwischen 1990 und 2007 fehlen hingegen. Aus diesem Grund wurde die Unterteilung des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor nach Nutzungsbereichen für diesen Zeitraum zwischen 1990 und 2007 auf Basis der Studie „Energieeffizienz in Zahlen“ [147] ermittelt, da es sich hierbei um wichtige Eingangs- bzw. Vergleichsparameter für Prognosemodelle zur Bestimmung des zukünftigen Energiebedarfs im Wohnungssektor handelt. Die Ergebnisse sind in Abb. 2.11 dargestellt und die genaue Methode zur Ableitung der Daten wird im Abschnitt C.1 erklärt.

In Abb. 2.11 ist ebenfalls zu sehen, dass die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor seit 1990 im Wesentlichen durch drei Phasen charakterisiert ist. In der ersten Phase (zwischen 1990-1996) gab es eine steigende Tendenz des Endenergieverbrauchs, gefolgt durch eine zweite Phase (1997-2001), in welcher der Endenergieverbrauch stagnierte, sowie eine dritte Phase (2002-2013), in welcher eine sinkende Tendenz des Endenergieverbrauchs sichtbar ist. Die Reduktion des Endenergieverbrauchs in den letzten Jahren ist vor allem auf den deutlichen Verbrauchsrückgang für Raumwärme zurückzuführen [148].

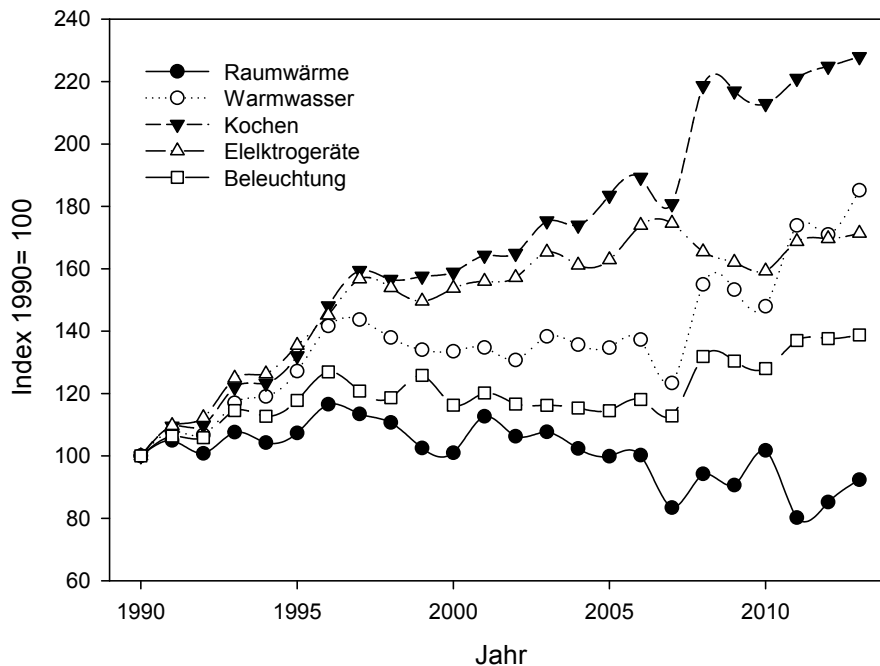
Wird die in Abb. 2.12 gezeigte Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Nutzungsbereichen (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung) betrachtet,



**Abb. 2.10:** Verteilung des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor (Bezugsjahr 2013) nach verschiedenen Nutzungsbereichen. Datenquelle: [64]



**Abb. 2.11:** Langfristige Entwicklung des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor nach Nutzungsbereich. Abgeleitet aus Datenquellen: [64, 147]

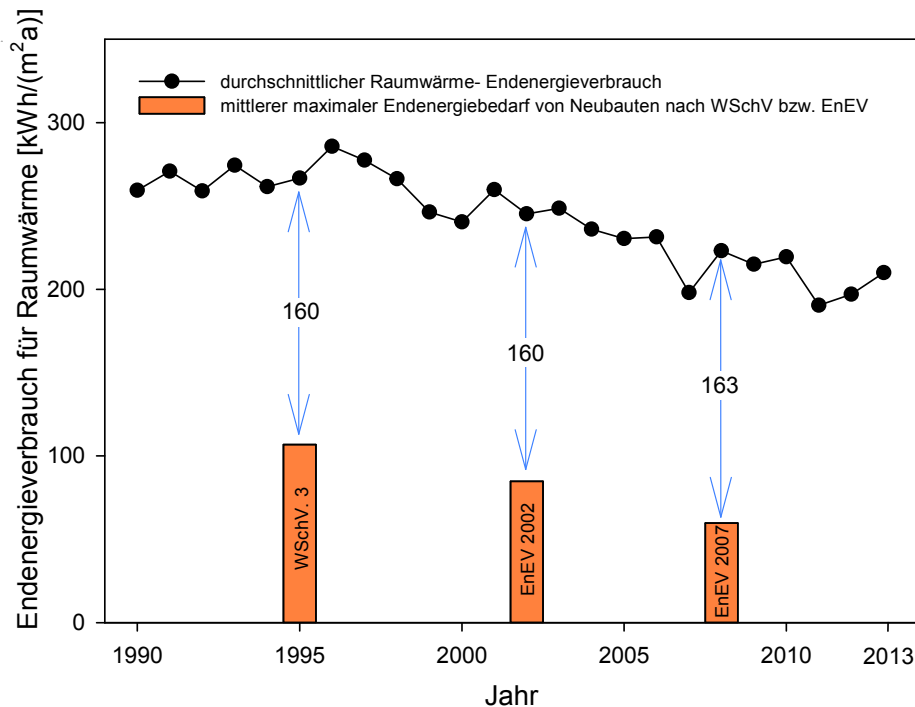


**Abb. 2.12:** Vergleich der Entwicklung des langfristigen Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor nach Nutzungsbereichen (Basisjahr 1990 = 100). Abgeleitet aus Datenquellen: [64, 147]

kann man feststellen, dass die Nutzungsbereiche Warmwasser, Kochen, Beleuchtung und Elektrogeräte eine deutliche Zunahme des Endenergieverbrauchs aufweisen, während der Endenergieverbrauch für Raumwärme, abgenommen hat. Dies hat insgesamt zu einer Abnahme des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor geführt, da die Abnahme für Raumwärme absolut betrachtet, die Zunahmen in den anderen Bereichen übersteigt. Der Anteil der Raumwärme am gesamten Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor lag hierbei im Zeitraum von 1990 bis 2013 zwischen 81% (im Jahr 1990) und 69% (im Jahr 2013) [64].

Die aus Abb. 2.12 ersichtliche Reduktion des Endenergieverbrauchs für Raumwärme ist hauptsächlich auf die Begrenzung des Jahres-Heizwärmebedarfs für Neubauten aufgrund der Anforderungen der Wärmeschutzverordnung bzw. Energieeinsparverordnung<sup>4</sup> zurückzuführen [147]. So wurde durch das Inkrafttreten der Energieeinsparverordnung 2002 und die dadurch erfolgte Verbesserung der Gebäudedämmung eine schrittweise Reduzierung des Raumwärmebedarfs im gesamten Wohnungssektor erzielt [150]. Dies konnte 2011 durch die Studie „Energieeffizienz in Zahlen“ [147] bestätigt werden, in welcher

<sup>4</sup>Die Auswirkungen der Wärmeschutzverordnung bzw. Energieeinsparverordnung auf Neubauten werden in Anhang B, Abschnitt B.1 erklärt.

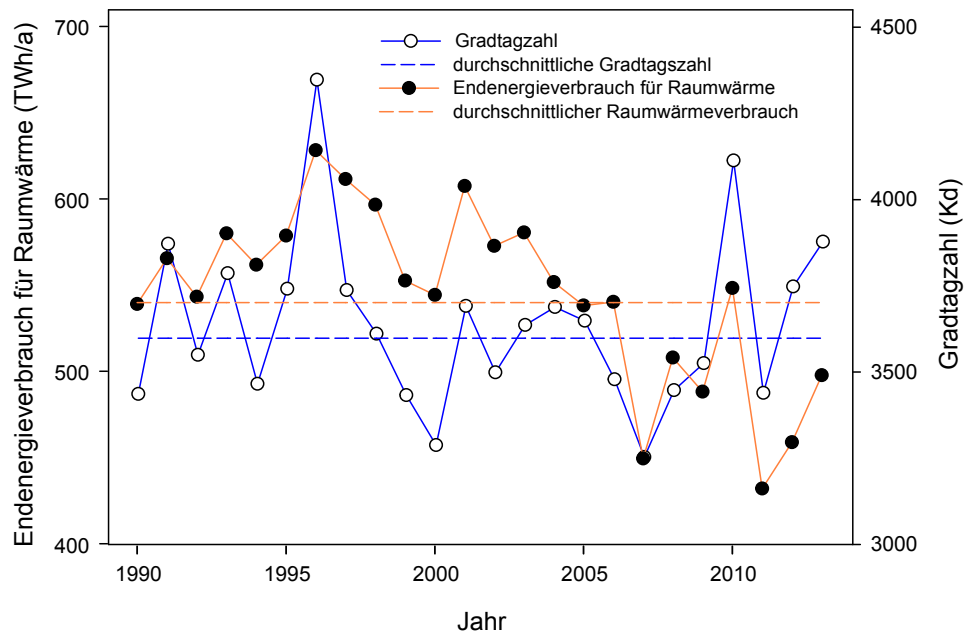


**Abb. 2.13:** Vergleich zwischen dem mittleren maximalen Endenergiebedarf für Raumwärme in Neubauten entsprechend der Wärmeschutzverordnung (WSchV) bzw. Energieeinsparverordnung (EnEV) und dem durchschnittlichen Endenergieverbrauch aller Wohngebäude in Deutschland. Abgeleitet aus Datenquellen: [64, 147, 149]

die Auswirkungen der Wärmeschutzverordnung bzw. Energieeinsparverordnung auf den Endenergieverbrauch für Raumwärme analysiert wurden.

In Abb. 2.13 ist zu sehen, dass sich die Differenz zwischen dem mittleren maximalen Endenergiebedarf für Raumwärme in Neubauten und dem durchschnittlichen Endenergieverbrauch aller Wohngebäude (Alt- und Neubauten) über die Jahre jedoch kaum verändert hat. Der in Abb. 2.13 gezeigte durchschnittliche Endenergieverbrauch im Bereich Raumwärme pro  $m^2$  Wohnfläche wurde hierbei mit Hilfe der Werte für den gesamten Endenergieverbrauch für Raumwärme (siehe Anhang C, Abschnitt C.1) und der gesamten Wohnfläche in Deutschland, entsprechend den Daten des Statistischen Bundesamtes [149], ermittelt.

In einer Studie des Umweltbundesamtes [151] wurde weiterhin herausgestellt, dass die Reduktion des Endenergieverbrauchs im Bereich Raumwärme zusätzlich in einer insgesamt sinkenden Tendenz für die jährliche Gradtagzahl begründet liegen könnte. Abb. 2.14 zeigt in diesem Zusammenhang, dass es eine direkte Verbindung zwischen der Gradtagzahl und dem Endenergieverbrauch für Raumwärme gibt. So ist bei kälteren Jahren (=



**Abb. 2.14:** Vergleich der langfristigen Entwicklung der Gradtagzahl bezogen auf die Heizgrenze  $15^{\circ}\text{C}$  und des Endenergieverbrauchs für Raumwärme in Deutschland. Abgeleitet aus Datenquellen: [64, 147, 152, 153]

hohe Gradtagzahl) ein höherer Endenergieverbrauch für Raumwärme zu verzeichnen, als bei wärmeren Jahren (= niedrige Gradtagzahl). Wenn man jedoch Abb. 2.14 genauer betrachtet, ist zu sehen, dass es keine deutlich sinkende Tendenz für die Gradtagzahlen im betrachteten Zeitraum gab (1990-2013). Dagegen ist ab dem Jahr 2001 eine deutlich sinkende Tendenz des Endenergieverbrauchs für Raumwärme zu beobachten. Ebenfalls ist zu sehen, dass der Endenergieverbrauch für Raumwärme seit dem Jahr 2005 den durchschnittlichen Verbrauch über den gesamten Zeitraum nur im Jahr 2010 überschritten hat. Aus diesen Gründen kann geschlussfolgert werden, dass das Klima, abgebildet durch die Gradtagzahlen, einen Einfluss auf den partikularen jährlichen Endenergieverbrauch für Raumwärme hat, jedoch die sinkende Tendenz des Endenergieverbrauchs durch die Tendenz der Gradtagzahlen nicht erklärt werden kann.

Ein wichtiger Faktor zur Reduktion des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor ist neben der oben bereits erwähnten Gebäudedämmung vor allem die Verbesserung des Nutzungsgrades von Anlagen und Geräten [154, 155]. Dies gilt aufgrund ihres hohen Anteils am Gesamtendenergieverbrauch vor allem für solche Anlagen, die der Bereitstellung von Raumwärme dienen.

Um die Reduktion des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor aufgrund von Änderungen des Nutzungsgrades von Anlagen und Geräten quantifizieren und bewerten zu können, wurden Daten verschiedener Studien untersucht, um die langfristige Entwicklung im Untersuchungszeitraum von 1990 bis 2010 zu bestimmen. Bei der Sichtung relevanter Datensätze [154, 156-171] wurde festgestellt, dass bisher noch keine repräsentative Studie erstellt worden ist, welche deutlich die langfristige Entwicklung des Nutzungsgrades, insbesondere von Heizungsanlagen, aufzeigt. Die meisten Studien liefern nur gemittelte Daten, die im Kontext des jeweiligen Publikationsjahres der Daten zu sehen sind, aber keine lückenlosen Informationen über eine fortlaufende Entwicklung geben. Obwohl die Werte in den verschiedenen Studien nicht immer übereinstimmen, ist generell im Laufe der Zeit, das heißt mit fortschreitendem Publikationsjahr, eine deutliche Verbesserung des Nutzungsgrades der Anlagen und Geräte zu beobachten. Weiterhin ist eine ausreichende Datenbasis vorhanden, um repräsentative Trendlinien, insbesondere für die Nutzungsbereiche Raumwärme und Warmwasser, erstellen zu können. Geeignet sind hierzu insbesondere Sättigungskurven, die grafisch das Leistungspotenzial einer Technologie in Abhängigkeit von der Zeit veranschaulichen. Unter Zuhilfenahme verschiedener Quellen [154, 156-171] sowie von Sättigungskurven (S-Kurve) wurde daher entsprechend Gleichung 2.1 für den Zeitraum 1990-2010 die Entwicklung des Nutzungsgrades der Anlagen/Geräte für die verschiedenen Nutzungsbereiche (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Beleuchtung, Elektrogeräte) im Wohnungssektor ermittelt. Da die Nutzungsgrade der Anlagen oder Geräte in Relation zur verwendeten Energiequelle unterschiedlich sein können, wurde hierbei nach Energiequellen (Heizöl, Gas, Strom, Fernwärme, Kohle und sonstigen inkl. erneuerbaren Energien) differenziert. Abb. 2.15 verdeutlicht die verwendete Methode am Beispiel der Entwicklung des Nutzungsgrades von Ölheizungsanlagen.

$$n(t) = S \cdot [1 - \exp^{-K \cdot (t-t_0)^2}] \quad (2.1)$$

mit:

$n(t)$  – Nutzungsgrad in Abhängigkeit der Zeit [%]

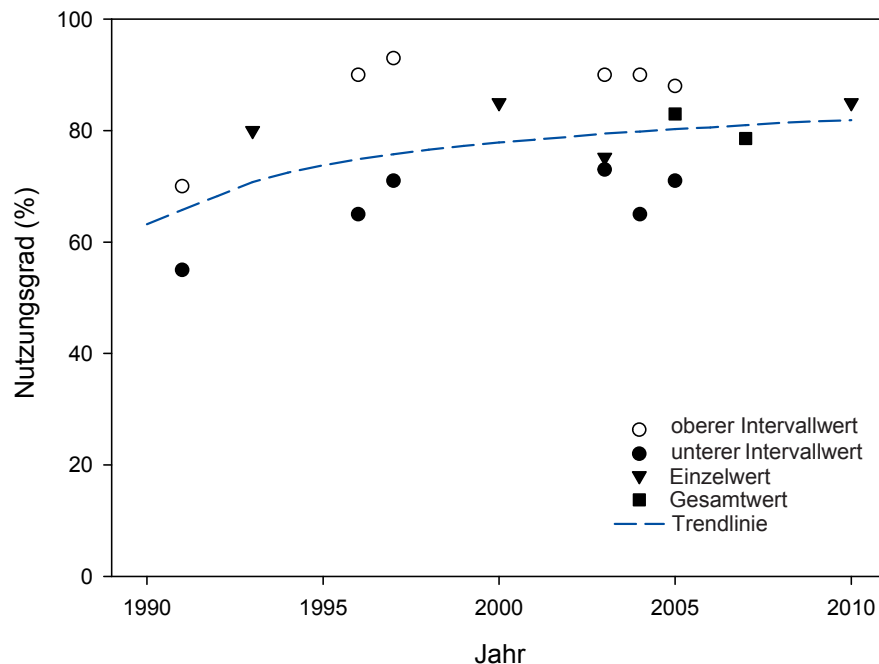
$S$  – eventuelle Sättigung [%]

$t$  – Zeit [Jahr]

$t_0$  – Zeit [Jahr], in der das Gerät eingeführt wurde

$K$  – Konstante, die die Geschwindigkeit der Aufnahme beschreibt  
(beschreibt die Form der S-Kurve)

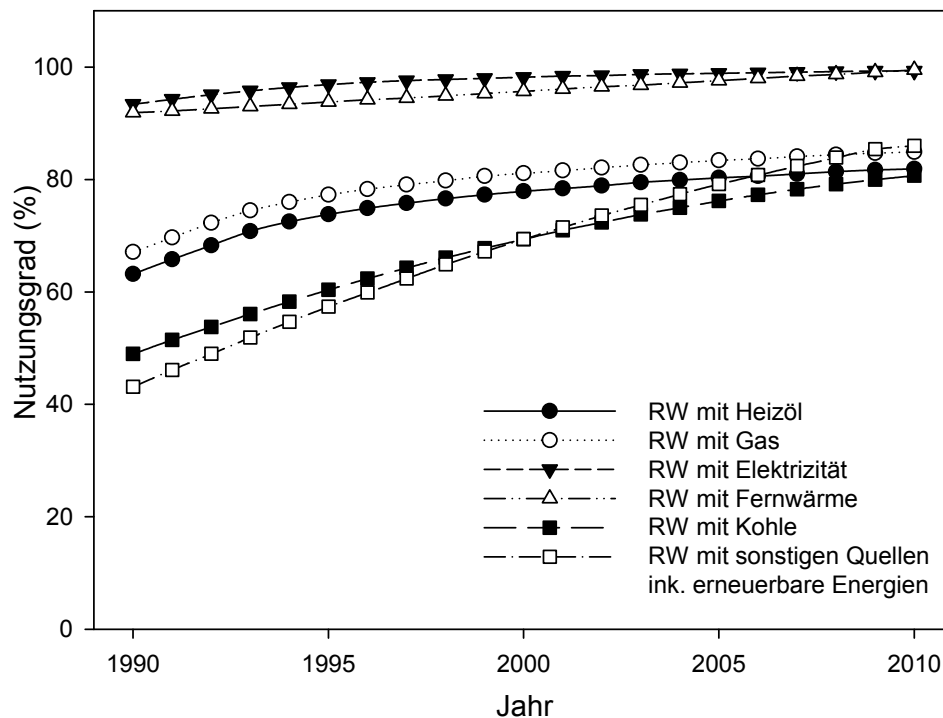




**Abb. 2.15:** Entwicklung des Nutzungsgrades von Ölheizungsanlagen in Deutschland. Hierbei gilt folgendes: weißer Kreis = oberer Intervallwert von Studien mit Intervallbereich, schwarzer Kreis = unterer Intervallwert von Studien mit Intervallbereich, schwarzes Dreieck = Einzelwert von Studien ohne Intervallangaben, schwarzes Quadrat = Gesamtnutzungsgrad nach Nutzungsbereich unabhängig vom Energieträger, z.B. für Raumwärme allgemein. Datenquellen: [154, 156, 159-165, 167-169]

Die in Abb. 2.15 gezeigte Entwicklung des Nutzungsgrades von Ölheizungsanlagen ist aus Mittelwerten der angegebenen Nutzungsgradbereiche der Studien von Hauser und Hausladen [160], GRE [159], IWU [165], Wagner et al. [167], Joss [163] und Loga et al. [164] entstanden. Zudem wurden einzelne Werte der Studien von Hauser und Hausladen [161], FfE [156] und PROBAS (für die Jahre 2000 und 2010) [169] sowie der Gesamtnutzungsgrad für Raumwärme aus den Arbeiten der Prognos AG und dem Öko-Institut [154] sowie Tzscheutschler et al. [168] mit berücksichtigt.

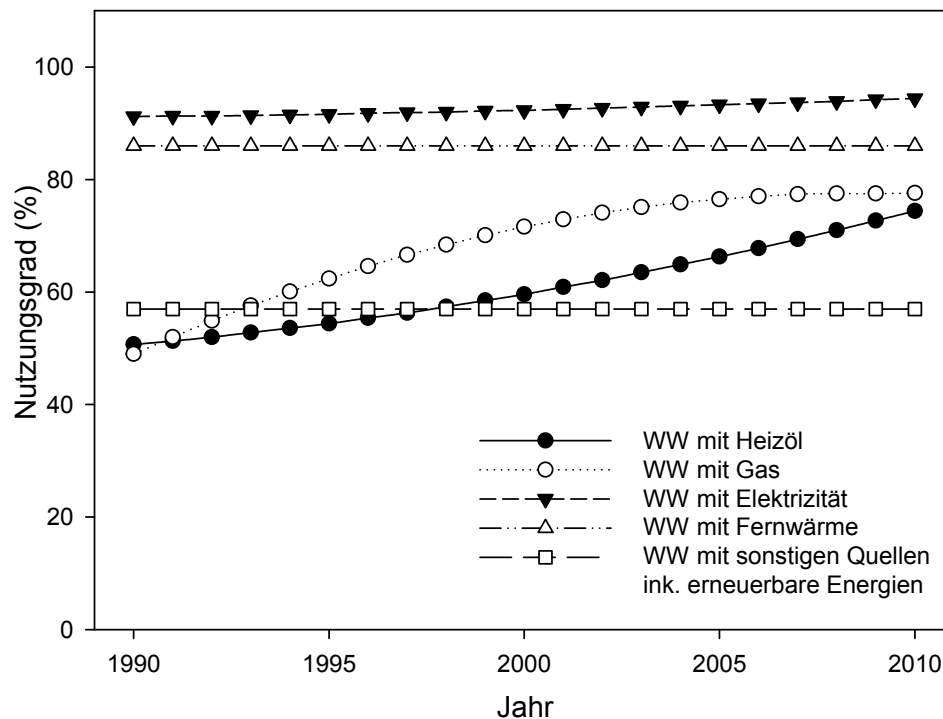
In der Abb. 2.15 ist eine deutliche Tendenz zur Verbesserung der Gerätenutzungsgrade zu beobachten, die in zwei Phasen unterteilt ist. Die erste Phase stellt eine starke Verbesserung des Nutzungsgrades über den Zeitraum 1990-1997 dar, die zweite Phase (1998-2010) besteht aus einer langsamen jährlichen Verbesserung. Im Jahr 2010 erreichte der mittlere Nutzungsgrad von Ölheizungsanlagen entsprechend dieser Analyse einen Wert von 85%. Die Streuung der Mittelwerte aller Studien in Bezug auf den hieraus abgeleiteten Trend beträgt nicht mehr als 13%. Dieses zeigt, dass eine signifikante Ähnlichkeit der Werte vorhanden ist.



**Abb. 2.16:** Entwicklung des Nutzungsgrades von Anlagen zur Bereitstellung von Raumwärme (RW) mit verschiedenen Energiequellen. Abgeleitet aus Datenquellen: [154, 156, 157, 160-164, 168-171]

Die Ergebnisse der Nutzungsgradentwicklung für Raumwärme in Abb. 2.16 zeigen, dass am Anfang des betrachteten Zeitraums der Unterschied der Nutzungsgrade in Abhängigkeit der Energiequelle deutlich größer ist (50%-Punkte) als am Ende des Zeitraums (19%-Punkte). Außerdem ist anzumerken, dass die Verbesserung des Nutzungsgrades deutlich bei Anlagen, die mit Heizöl, Gas, Kohle oder sonstigen Energiequellen inkl. der erneuerbaren Energien betrieben werden, zu erkennen ist. Detaillierte Betrachtungen zu der Entwicklung des Nutzungsgrades nach Energiequelle sind in Anhang C, Abschnitt C.2 zu finden. Hierbei ist zu erwähnen, dass der Anteil der Energiequellen Gas und Heizöl am Endenergieverbrauch für Raumwärme im betrachteten Zeitraum (1990-2010) relativ konstant geblieben ist (zwischen 76% und 83%), während die Nutzung von Kohle von 4,4% auf 0,7% gesunken und die Verwendung der erneuerbaren Energien von 3% auf 12% gestiegen ist.

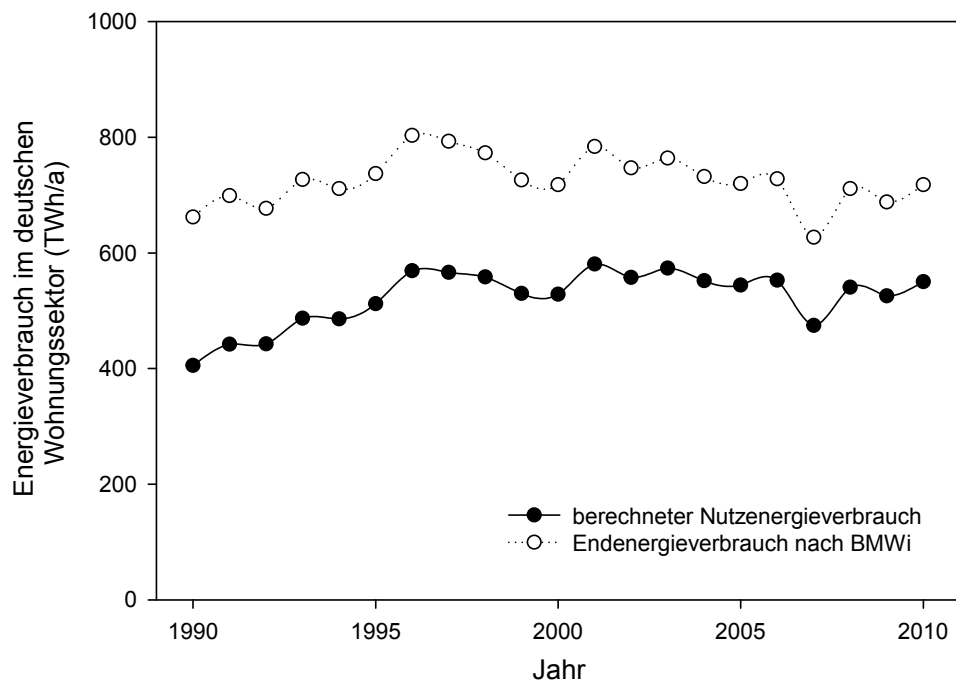
Eine ähnliche Situation wie bei der Raumwärme ist, wie aus Abb. 2.17 ersichtlich wird, bei der Entwicklung des Nutzungsgrades im Bereich Warmwasserbereitstellung zu verzeichnen. Bei der Entwicklung des Nutzungsgrades im Bereich Kochen ist festzustellen, dass in den meisten Fällen elektrische Geräte (ca. 85%) verwendet wurden. Daher betrug der



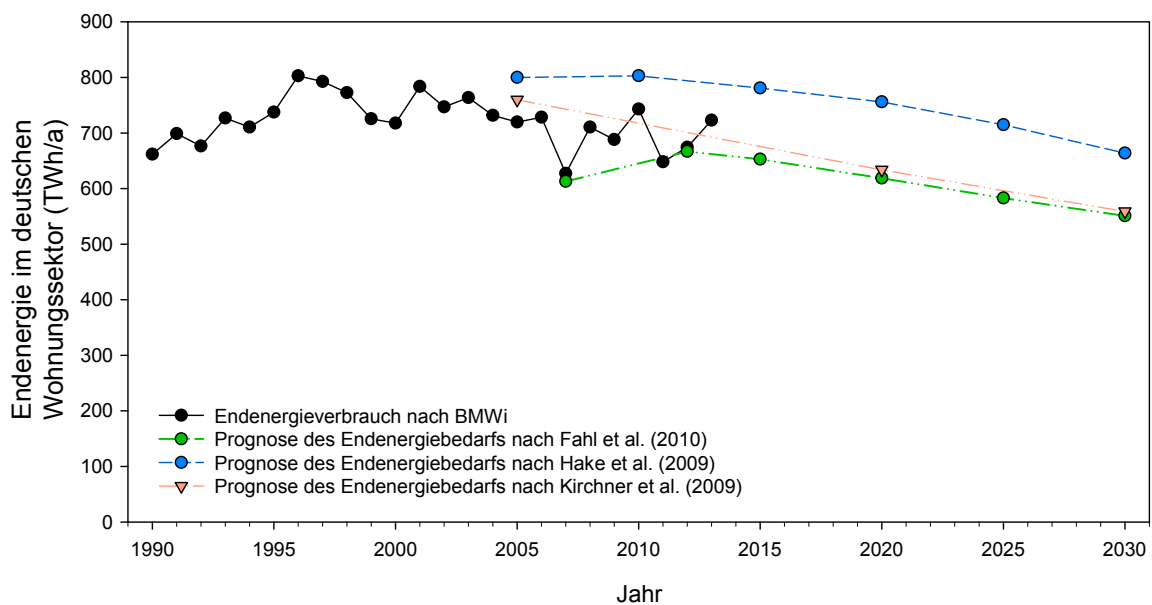
**Abb. 2.17:** Entwicklung des Nutzungsgrades für Warmwasserbereitstellung (WW) mit verschiedenen Energiequellen. Abgeleitet aus Datenquellen: [154, 161-165, 168, 169]

Wirkungsgrad nahezu 100%. Beim Kochen mit Gas (ca. 15%) liegt der Wirkungsgrad bei 65%. Im Bereich der Beleuchtung ist zu beobachten, dass der durchschnittliche Nutzungsgrad der Leuchten bis 2005 konstant ca. 7% betrug. Am Ende des betrachteten Zeitraums ist dieser Wert aufgrund der zunehmenden Verbreitung von Kompaktleuchtstofflampen im Wohnungssektor bis auf 30% gestiegen.

Zusammenfassend ermöglicht die oben beschriebene Ermittlung der Nutzungsgrade nach Nutzungsbereichen und Energiequelle in erster Linie die Berechnung des Nutzenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor, auf Grundlage derer wiederum die Auswirkungen der Verbesserung der Nutzungsgrade auf die Reduktion des Endenergieverbrauchs bestimmt werden können. Für diese Berechnung wurden in dieser Arbeit Daten zum Anteil der Energiequellen an den verschiedenen Nutzenergien im Wohnungssektor entsprechend der Studie „Energieeffizienz in Zahlen“ [147] verwendet (siehe Anhang C, Abschnitt C.3). Die Ergebnisse zur langfristigen Entwicklung des Nutzenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor in Abb. 2.18 zeigen, dass sich die Differenz zwischen Nutzenergieverbrauch und Endenergieverbrauch von 38% auf 23% im betrachteten Zeitraum (1990–2010) verringert hat. Dies bedeutet, dass eine Reduktion des Endenergieverbrauchs im deutschen



**Abb. 2.18:** Vergleich zwischen der langfristigen Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach BMWi [64] und dem berechneten Nutzenergieverbrauch



**Abb. 2.19:** Vergleich zwischen den Daten für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor nach BMWi [64] und verschiedenen Prognosen des zukünftigen Endenergiebedarfs. Datenquellen: [65-67]

Wohnungssektor um 15% im Jahr 2010 erreicht wurde, im Vergleich zu einer theoretischen Entwicklung des Endenergieverbrauchs ab 1990 ohne Verbesserung des Nutzungsgrades der Anlagen/Geräte.

Es gibt verschiedene Studien, die für die Zukunft eine weitere Reduktion des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor prognostizieren (Abb. 2.19). Nach Aussagen des Institutes für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung sollte der Endenergiebedarf bis 2030 um 10%-Punkte gegenüber dem Jahr 2007 sinken [65]. Laut einer anderen Studie des Forschungszentrums Jülich wird erwartet, dass sich der Endenergiebedarf bis 2050 gegenüber 2005 um bis zu 54%-Punkte reduzieren wird [66]. Im Gegensatz dazu steht die Studie „Modell Deutschland Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken“, in der von einer Reduktion von 26%-Punkte bis 2030 gegenüber 2005 und einer Reduzierung um 43%-Punkte bis 2050 gegenüber 2005 ausgegangen wird [67]. Die Ergebnisse dieser Studien lassen nicht auf einen einheitlichen Konsens schließen. Jede Prognose hängt von ihren spezifischen Annahmen ab. Da, wie eingangs in Abschnitt 1.1 dargestellt, eines der wesentlichen Ziele dieser Arbeit die Verbesserung der Genauigkeit der Prognose des zukünftigen Endenergiebedarfs im Wohnungssektor in Deutschland ist, kommt der im folgenden Kapitel vorgenommenen kritischen Analyse und Auswertung dieser Annahmen somit eine wichtige Bedeutung zu. Eine detaillierte Analyse der obengenannten Prognosen ist in Kapitel 5 zu finden.



### **3 Bestehende Modelle und benötigte Daten zur Bestimmung des Endenergieverbrauchs bzw. zur Prognose des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor**

Ein Modell ist eine abstrakte Darstellung der Realität [172]. Es besteht zum einen aus Elementen, welche die modellierte Realität charakterisieren (Eingangsparameter) und wird zum anderen geprägt aus der Form der Verbindung zwischen diesen Elementen (Bedingungen, Funktionen, Gleichungen). Diese Verbindungen und die dadurch entstehenden Interaktionen zwischen Eingangsparametern generieren Ergebnisse (Ausgangsparameter).

Modelle werden im Wohnungssektor im Wesentlichen zur Bestimmung des aktuellen Endenergieverbrauchs und zur Prognose des zukünftigen Endenergiebedarfs verwendet [28]. Zusätzlich dazu ermöglichen Energiemodelle im Wohnungssektor die Beurteilung der Auswirkungen von zukünftigen Energieeinsparmaßnahmen und die Identifizierung der wichtigsten Einflussfaktoren auf den Endenergieverbrauch von Gebäuden [98, 173]. Die Maßnahmen, die auf Grundlage der Modellierung ergriffen werden, können somit einen Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Reduktion der durch Gebäude verursachten Treibhausgase leisten [174]. Energiemodelle sind daher ein geeignetes Werkzeug zur Beantwortung von Fragen, die sich im Rahmen von Klimaschutzzielen stellen, zum Beispiel wie sich der zukünftige Endenergiebedarf und somit auch die Treibhausgasemissionen entwickeln werden und von welchen Faktoren dies abhängig ist [175].

Die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Modelle wurden entwickelt, um den Endenergieverbrauch entweder speziell für den Wohnungssektor oder für den Wohnungssektor und zusätzliche Sektoren (GHD, Verkehr und Industrie) abzubilden. In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden diese bereits bestehenden Modelle zur Prognose des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor beschrieben und analysiert. Die Analyse wird hierbei ausschließlich für Modelle mit frei zugänglicher Software oder frei zugänglichem Berechnungsverfahren durchgeführt. Dies betrifft zwölf Modelle: MAED-2 [9], FfE-Gebäudemodell [16], CDEM [62], REM [15], CREEM [18], ECCABS [21, 22], REEPS [176], BREHOMES [20], LEAP [10], BSM [27], DECM [24] und CHM [19].

Diese werden in Tab. 3.1 mit ihrer Kurzbezeichnung, ihrem genauen Titel, dem Entwickler (Institution) sowie einer kurzen Beschreibung aufgeführt. Eine ausführliche Beschreibung jedes dieser Modelle wird in Anhang D dargestellt.

**Tab. 3.1:** Bestehende Modelle zur Bestimmung des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor

Name des Modells	Entwickler	Kurzbeschreibung der Kernfunktionen
LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning)	SEI–Stockholm Environment Institute, Tellus Institute, USA. [10]	Analyse und Bewertung der Auswirkungen von energie- und umweltpolitischen Maßnahmen. Berechnung für den Wohnungssektor, GHD, Verkehr und Industrie.
FfE Gebäudemodell (Forschungsstelle für Energiewirtschaft- Gebäudemodell)	Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), Deutschland. [16]	Auf Basis von verfügbaren statistischen Datenquellen ermöglicht das Modell differenzierte Aussagen zum Wohngebäudesektor in Deutschland, wie z.B. die Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser oder die Ermittlung der nutzbaren Dachflächen für solare Anwendungen.
REM (Regional Engineering Model)	University of Joensuu, Finnland. [15]	Überschlägige Berechnung des jährlichen Endenergiebedarfs, der CO <sub>2</sub> -Emissionen und der resultierenden Heizenergiekosten im Wohnungssektor.
BSM (bottom-up Building-Stock-Model)	Karlsruhe Institute of Technology, Deutschland. [27]	Modellierungswerkzeug zur Prognose der Gebäudebestandsentwicklung (basierend auf Projektionen von Wohnfläche und Abriss-/ Sanierungsraten) und dem Endenergiebedarf (basierend auf statistischen Daten des spezifischen Endenergieverbrauchs für Raumwärme) im deutschen Wohnungssektor.
MAED-2 (Model for Analysis of Energy Demand)	International Atomic Energy Agency, Österreich. [9]	Projektion des Endenergiebedarfs eines Basisjahres (Grundenergiebedarf) auf einen mittel- bis langfristigen Zeitraum unter Einbezug von sozioökonomischen, technologischen und demographischen Faktoren. Berechnungen für den Wohnungssektor, GHD, Verkehr und Industrie.
ECCABS (Energy, Carbon and Costs Assessment of Building Stocks)	Chalmers University of Technology, Schweden. [21, 22, 177]	Berechnungen des jährlichen Endenergiebedarfs, der CO <sub>2</sub> - Emission und der Kosten, welche in Verbindungen mit dem Wohnungssektor stehen. Dieses Modell ist dafür entwickelt worden, Energieeinsparmaßnahmen und CO <sub>2</sub> -Emissionen vorbeugende Maßnahmen zu beurteilen.
CDEM (Community Domestic Energy Model)	Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University, UK. [62]	Unter Verwendung des Kernrechners BREDEM-8 kalkuliert dieses Modell den monatlichen Energieverbrauch und die CO <sub>2</sub> - Emission im englischen Wohnungssektor, wobei es den englischen Wohnungsbestand in 47 verschiedene Haus- Archetypen unterteilt.
CREEM (Canadian Residential Energy End-use Model)	Canadian Residential Energy End-use Data and Analysis Centre, Kanada. [18]	Berechnung des jährlichen und monatlichen Endenergiebedarfs und der CO <sub>2</sub> -Emissionen im Wohnungssektor. Die Software HOT2000 [40] wird als Kernrechner verwendet.
BREHOMES (Building Research Establishment Housing Model for Energy Studies )	Building Research Establishment (BRE), UK. [20]	Aufteilung des Wohnungsbestandes im Vereinigten Königreich in über 1000 Gebäudekategorien und Berechnung des Energieverbrauches jedes Gebäudetyps mit BREDEM-12 [38].
REEPS (Residential End-Use Energy Planning System)	Electric Power Research Institute, USA. [1, 2, 176]	Evaluierung von zukünftigen Energieverbrauchstrends im US-amerikanischen Wohnungssektor (basierend auf prognostizierten Geräteinstallationen, Nutzungsgrad, und Energieverbrauch für Raumwärme, Warmwasser, Klimaanlage und Kochen) unter Berücksichtigung verschiedener Entwicklungsszenarien.
DECM (Domestic Energy and Carbon Model )	The Martin Centre for Architectural and Urban Studies, Department of Architecture, University of Cambridge, UK. [24]	Prognose des Endenergiebedarfs und der CO <sub>2</sub> -Emission im englischen Wohnungssektor unter Verwendung des Kernrechners SAP-2005 (Standard Assessment Procedure) [178].
CHM (Cambridge Housing Model )	Cambridge Architectural Research Ltd (CAR), UK. [19]	Bestimmt den Endenergiebedarf im Wohnungssektor des UK mit SAP-2009 [180].



### 3.1 Unwägbarkeit bestehender Modelle zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor

Mit Ausnahme von LEAP und MAED-2 wurden alle hier untersuchten bestehenden Modelle zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor (Tab. 3.1) speziell für ihr Ursprungsland unter Berücksichtigung der landesspezifischen Rahmenbedingungen entwickelt. Die Modelle BREHOMES [20] und CREEM [18] beispielweise wurden für das Vereinigte Königreich (UK) beziehungsweise Kanada entwickelt. Es ist daher unklar, ob diese, für ein spezifisches Land entwickelte Modelle, auch auf andere Länder übertragbar sind. Zudem stellt sich die Frage, welche Anpassungen notwendig wären, um eine Übertragbarkeit zu ermöglichen.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Modellierung liegt im unterschiedlichen Detaillierungsgrad der Modelle begründet und damit einhergehend in der unterschiedlich hohen Aufschlüsselung der benötigten Eingangsparameter.

Modelle mit einem hohen Detaillierungsgrad und somit einer großen Anzahl von Eingangsparametern ermöglichen ein besseres Verständnis des Einflusses verschiedener Eingangsparameter. Allerdings ist die Dateneingabe oftmals mit Schwierigkeiten verbunden, da die zur Verfügung stehenden Daten, die meistens aus statistischen Datensammlungen stammen [58], oft nicht mit dem vom Modell benötigten Detaillierungsgrad übereinstimmen [16]. In einigen Fällen kann dies dazu führen, dass eine weitere Detailebene zur bestehenden Basisinformation hinzugefügt werden muss [121]. Dies erschwert und verlangsamt letztlich den Modellierungsprozess.

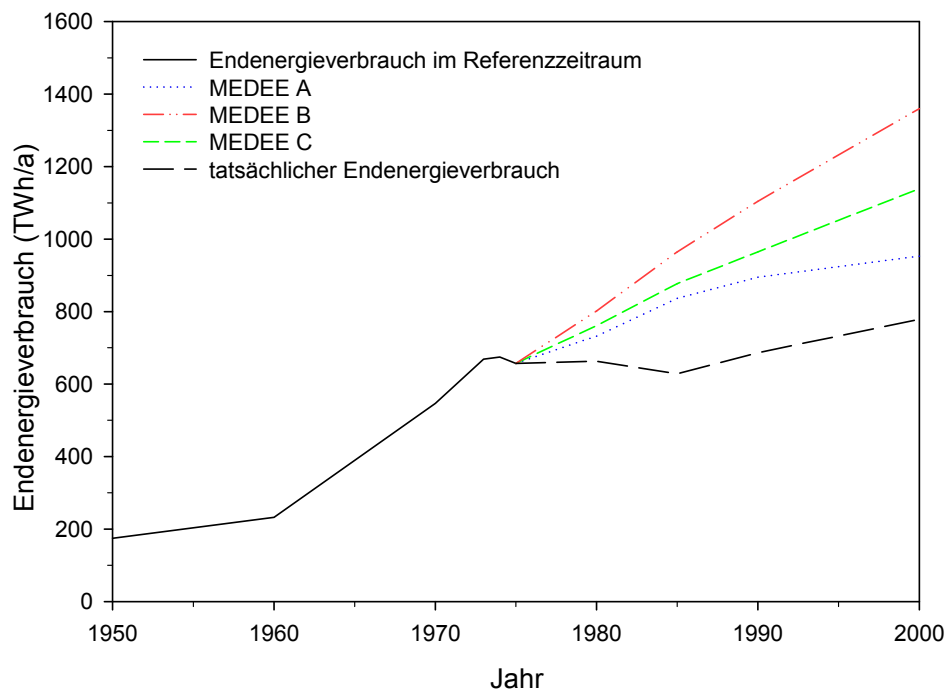
Modelle mit einem geringen Detaillierungsgrad benötigen dagegen nur eine geringe Anzahl von Eingangsparametern. Dies erleichtert die Sammlung von Daten für die im Modell vorhandenen Eingangsparameter, hat jedoch den Nachteil, dass die Auswirkungen von spezifischen Energieeinsparmaßnahmen potentiell unterschätzt werden oder aber unter Umständen überhaupt nicht in Betracht gezogen werden können. Dies könnte möglicherweise nachteilige Auswirkungen auf die Entscheidungsfindung haben, da die Auswirkungen von spezifischen Energieeinsparmaßnahmen nicht genau beurteilt werden können. Einige Modelle wie LEAP [10] oder das FfE-Gebäudemodell [16] können beispielsweise die Reduktion des Endenergieverbrauchs als Folge einer Verbesserung der Wärmedämmung von Gebäuden nicht direkt berücksichtigen [181]. Dies wirkt sich prinzipiell ungünstig auf die Bestimmung des zukünftigen Endenergiebedarfs im Wohnungssektor aus. So hat es in Deutschland in den letzten Jahrzehnten durch eine stetige Verbesserung der Wärmedämmmaterialien [181] und aufgrund der Einführung der „Wärmeschutzverordnung“ im

Jahr 1977 mit geänderten Fassungen 1984 und 1995 und die darauf folgende „Energieeinsparverordnung“ (EnEV), veröffentlicht im Jahr 2002 mit einer größeren Überarbeitung im Jahr 2007, einen kontinuierlichen Rückgang des durchschnittlichen Endenergieverbrauchs in neuen Gebäuden gegeben (s. Abschnitt 2.3) [148, 151, 182]. Dies lässt sich mit solchen Modellen nicht abbilden und unterstreicht die Notwendigkeit, eine Liste von optimalen Eingangsparametern zu definieren, welche zum einen die Simulation erleichtern und zum anderen ein hohes Maß an Genauigkeit für die Prognose gewährleisten können.

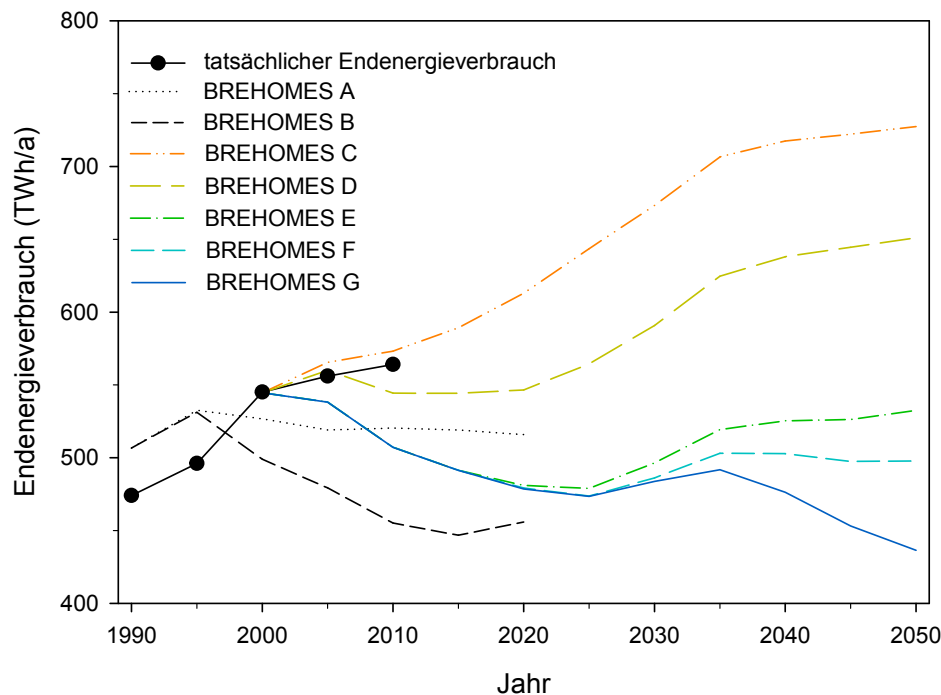
Die Genauigkeit der Ergebnisse von zur Zeit verfügbaren Prognosemodellen im Wohnungssektor wurde üblicherweise anhand von statistischen Daten für das jeweilige Ursprungsland des Modells überprüft. Jedoch wurden die meisten Modelle, abgesehen von CDEM [62], DECM [24], CHM [26] und BSM [27], nicht bezüglich möglicher Unsicherheiten in der Modellprognose aufgrund der Verbindungen und Interaktionen der Eingangsparameter überprüft [24, 26]. So wurden z.B. die Ergebnisse des ECCABS-Modell [22] mit statistischen Daten zum Endenergieverbrauch im schwedischen Wohnungssektor verglichen [183, 184], allerdings ohne dass eine Überprüfung des Einflusses der einzelnen Eingangsparameter vorgenommen worden wäre. Weiterhin gibt dieser Ansatz zur Überprüfung der Modellgenauigkeit kein Indiz darüber, ob das Modell in der Lage ist, den Endenergiebedarf in einem anderen Land zu prognostizieren. Dies stellt die Übertragbarkeit des jeweiligen Modells in Frage. Die Unsicherheit in den Prognosen der Modelle CDEM, DECM, CHM und BSM wurde mittels Sensitivitätsanalysen bestimmt [62], mit denen außerdem gleichzeitig der Einflussgrad von Schwankungen der Eingangsparameter auf die Ausgangsparameter dokumentiert werden konnte. Firth et al. [62], Cheng und Steemers [24] sowie Kavgić et al. [185] kommen unabhängig voneinander zum Schluss, dass die vorhandenen Mängel, welche in der oft fehlenden Quantifizierung der inhärenten Modellunsicherheiten und der fehlenden Transparenz begründet liegen, überprüft werden müssen, da die Prognosen der Modelle ohne eine sorgfältige Überprüfung der Ergebnisse an Glaubwürdigkeit verlieren.

Eine andere Unwägbarkeit bestehender Modelle liegt in den Annahmen, die der Erstellung von Szenarien zugrunde liegen. Laut Wilms [186] ist ein Szenario *„... ein plausibel ausformuliertes, hypothetisches Zukunftsbild eines abgegrenzten Problemfeldes, das alternative Entwicklungsmöglichkeiten berücksichtigt und der Entscheidungsvorbereitung dient“*. Für die hier beschriebenen bestehenden Modelle werden typischerweise die Auswirkungen von verschiedenen Eingangsparametern, wie z.B. die Entwicklung der Anzahl der Gebäude, die Implementierung von neuen Heizungstechnologien oder die Verbesserung der Wärmedämmung von Bauteilen, als Gegenstand von Zukunftsszenarien betrachtet. Die als relevant identifizierten Eingangsparameter fließen hierbei in die Szenarien ein, um die zukünftige

Entwicklung des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor zu simulieren. Hierbei ist auffällig, dass diese Szenarien oftmals in erster Linie zur Evaluierung der theoretischen Auswirkungen von Energieeinsparmaßnahmen aufgestellt werden [156]. Abb. 3.1 und Abb. 3.2 zeigen in diesem Zusammenhang einen Vergleich zwischen tatsächlich aufgetretenem Endenergieverbrauch entsprechend den nationalen Statistiken für Frankreich [123] und UK [71] und den Ergebnissen unter verschiedenen Szenarien für die ursprünglichen Versionen von MAED-2 (MEDEE) [187] (Abb. 3.1) und BREHOMES [20, 188] (Abb. 3.2). Hierbei ist auffällig, wie stark die einzelnen Prognosen von den tatsächlich aufgetretenen jährlichen Endenergieverbrauchskennwerten abweichen. Während die in Abb. 3.1 zu verzeichnenden Abweichungen jedoch eine signifikante Überschätzung des Endenergiebedarfs zeigen, sind in Abb. 3.2 vor allem Unterschätzungen zu sehen. Um dies zu verstehen, ist es erforderlich, die einzelnen Szenarien im Kontext ihrer Entstehung sowie die tatsächlich eingetretenen Entwicklungen im Endenergieverbrauch mit den dazugehörigen Gründen zu betrachten.



**Abb. 3.1:** Vergleich zwischen dem tatsächlich aufgetretenen Endenergieverbrauch und dem mit MEDEE (Szenarien A, B und C) prognostizierten Endenergiebedarf im französischen Wohnungs- und GHD Sektor. Daten für den tatsächlichen Verbrauch: Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2014 [123]. Daten zum mit MEDEE prognostizierten Endenergiebedarf: Chateau et al. 1979 [187]



**Abb. 3.2:** Vergleich zwischen dem tatsächlich aufgetretenen Endenergieverbrauch und dem mit BREHOMES (Szenarien A, B, D,C,D,E,F und G) prognostizierten Endenergiebedarf im britischen Wohnungssektor. Daten für den tatsächlichen Verbrauch: DECC, 2013 [71]. Daten zum mit BREHOMES prognostizierten Endenergiebedarf: Shorrocks und Dunster, 1997 [20] für Szenarien A und B sowie Shorrocks et al. 2005 [188] für Szenarien C,D,E,F und G

Der Vergleich der Ergebnisse zwischen dem tatsächlich aufgetretenen Endenergieverbrauch [123] und dem mit MEDEE [187] im Jahr 1975 für die Zukunft prognostizierten Endenergiebedarf im französischen Wohnungs- und Dienstleistungssektor (Abb. 3.1) zeigt, dass das Szenarium A gefolgt von Szenarium C am geringsten von der Wirklichkeit abweicht. Zur Erstellung des Szenariums A wurde von den Autoren von MEDEE ein starker Anstieg in der Entwicklung und Implementierung von neuen Technologien (z.B. Wärmepumpen, Solaranlagen für die Wärmebereitstellung) angenommen [187]. Der größte Unterschied zwischen diesem Szenarium und den statistischen Daten liegt im Jahr 1985 mit einem relativen Abweichungsfehler von 33%. Zur Erstellung des Szenariums C wurden ähnliche Annahmen wie für die Erstellung von Szenarium A, aber mit einem geringeren Anstieg in der Entwicklung und Implementierung von neuen Technologien, verwendet. Der größte Unterschied zwischen Szenarium C und den statistischen Daten liegt mit einem relativen Abweichungsfehler von 46% im Jahr 2000. Das Szenarium B bildet mit einem relativen Abweichungsfehler von 75% im finalen Jahr der Prognose (2000) das ungenaueste Szena-

rium (Abb. 3.1). Zur Erstellung des Szenariums B wurde von den Autoren von MEDEE angenommen, dass die zukünftige Entwicklung des Endenergiebedarfs (ab 1975) dieselbe Tendenz wie in den vergangenen Jahren (vor 1975) haben würde [187]. Dies bedeutet, dass bei einer Projektion des Endenergiebedarfs auf Basis der vorherigen Entwicklung über das Jahr 2000 hinaus, der Endenergiebedarf in den einzelnen Szenarien im Vergleich zum Trend der tatsächlichen Entwicklung weiterhin stärker ansteigen würde und somit perspektivisch auch der Abweichungsfehler. Dies unterstreicht die Bedeutsamkeit der Annahmen zur Entwicklung von Szenarien. Aus der Grundannahme für das Szenarium B folgt im Hinblick auf die Genauigkeit der projizierten Ergebnisse, dass eine Projektion des Endenergiebedarfs allein auf Basis der Tendenz der bisherigen Entwicklung nicht geeignet ist, eine genaue Prognose des Endenergiebedarfs zu erstellen. Insgesamt ist in Abb. 3.1 zu sehen, dass bei allen Szenarien (A, B und C) der Endenergieverbrauch überschätzt wurde. Die Ursache dafür liegt hauptsächlich in den Ölkrisen der 1970er Jahre begründet. In den 70er und 80er Jahren stieg der Ölpreis um bis zu 500% an, was zu einer deutlichen Verringerung des Ölverbrauchs führte [189-191]. Im Fallbeispiel Frankreich nahm der Ölverbrauch im Wohnungs- und GHD-Sektor von 380 TWh/a im Jahr 1973 auf 174 TWh/a im Jahr 2002 ab [192]. Im Jahr 1975 wurden ca. 60% des Endenergiebedarfs im französischen Wohnungs- und GHD-Sektor durch Öl gedeckt [123, 192], während im Jahr 2000 dieser Anteil um die Hälfte zurück ging (auf 30%) [190]. Hierbei wurde das Öl anteilig durch Elektrizität, Gas und erneuerbare Energien ersetzt [193]. Dieser Austausch der Energiequelle verbunden mit einer Verbesserung des Nutzungsgrades insbesondere der Heizanlagen, hatte zusammen mit dem Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung (Première Réglementation Thermique [194]) im Jahr 1974 und weiteren Novellierungen (1982, 1988) eine Stagnation des gesamten Endenergieverbrauchs im französischen Wohnungs- und GHD-Sektor zur Folge [195, 196].

Abb. 3.2 zeigt einen Vergleich zwischen dem tatsächlichen Endenergieverbrauch im britischen Wohnungssektor nach DECC (Department of Energy and Climate Change) [71] und dem mit BREHOMES prognostizierten Endenergiebedarf [20, 188]. Hierbei ist zu sehen, dass in den Jahren 1990-2010 eine Zunahme des Endenergieverbrauchs im britischen Wohnungssektor zu verzeichnen war [71]. Außerdem ist zu sehen, dass die ersten zwei Prognosen von BREHOMES aus dem Jahr 1995 (Szenarien A und B) [20] nicht mit dem tatsächlich aufgetretenen Endenergieverbrauch übereinstimmen. Hierbei muss erklärt werden, dass zur Erstellung beider Szenarien (A und B) ein Referenzjahr (1990) betrachtet wurde, für das die Autoren gemessene Daten des Endenergieverbrauchs von 1992 bis 1994 aus verschiedenen Studien [197-201] für den Wohnungssektor verwendet haben. Diese Daten wurden dann für das Modell derart korrigiert, dass für das Referenzjahr 1990 eine Au-

ßentemperatur angenommen wurde, die dem langfristigen Durchschnitt entspricht [202]. Im Jahr 1990 war die durchschnittliche jährliche Außentemperatur jedoch 1,5 °C höher als im langfristigen Durchschnitt. Dies erklärt die Abweichung des modellierten Endenergiebedarfs für 1990 von den statistischen Daten. Nach der Berechnung des Endenergiebedarfs im Referenzjahr wurde eine Prognose ab dem Jahr 1995 erstellt. Für die Prognosen wurden langfristige durchschnittliche Außentemperaturen und die dazugehörigen Annahmen der Szenarien betrachtet. Szenarium A berücksichtigt, entsprechend den Annahmen von Shorrocks und Dunster [20], eine Fortsetzung des Trends für die Bevölkerungsentwicklung bis zum Referenzjahr (1990) sowie ein Wachstum der Anzahl der Wohnungen, die Erhöhung der Anzahl der mit Zentralheizung ausgestatteten Gebäude (im Jahr 1990 in 80% der Gebäude vorhanden) und eine Erhöhung der Innentemperatur von Gebäuden. Zusätzlich dazu berücksichtigt es aber auch die Anwendung von Energieeinsparmaßnahmen, wie die Verbesserung der Wärmedämmung von Bauteilen, den vermehrten Einsatz von Fenstern mit Doppelverglasung oder die Erhöhung des Nutzungsgrades von Öl- oder Gaskesseln für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser. Szenarium B berücksichtigt die gleichen Entwicklungen wie Szenarium A für die Anzahl der Wohnungen, die Anzahl der mit Zentralheizung ausgestatteten Gebäude und die Innentemperatur, aber verbunden mit einem starken Anstieg in der Anwendung von Energieeinsparmaßnahmen. So wird im Szenarium B zum Beispiel davon ausgegangen, dass in einem Zeitraum von fünf Jahren (1990-1995) alle Gebäude mit einem gedämmten Dach ausgestattet sind, dass bis ca. 2013 80% aller Bestandsgebäude mit zweischaligem Mauerwerk eine Kerndämmung besitzen oder dass der Anteil an Gebäuden mit Doppelverglasung der Fenster von 61% im Jahr 1995 auf 100% im Jahr 2013 ansteigen wird.

Der Grund, warum in beiden Szenarien (A und B) der tatsächliche Endenergieverbrauch erheblich unterschätzt wird (der Mittelwert der prozentualen Differenz ist größer als 15%), liegt im Wesentlichen darin, dass die Anwendung der aufgezeigten Energieeinsparmaßnahmen zwar Mitte der 1990er Jahre begann, die Auswirkungen dieser Maßnahmen aber erst zehn Jahren später (ab 2004) wahrgenommen werden konnten [203]. Laut Ray et al. [203] liegt dies daran, dass die angewendeten Energieeinsparmaßnahmen bis 2004 im britischen Wohnungssektor nicht ausreichend waren, um die Faktoren, die eine Zunahme des Endenergiebedarfs bewirken, wie die wachsende Anzahl der Wohnungen, die wachsende Anzahl der Haushaltsgeräte oder die Zunahme der beheizten Räume, zu kompensieren.

Die oben genannten Gründe, die dazu geführt haben, dass die Ergebnisse der ersten zwei Szenarien nicht mit den tatsächlichen Daten für den Endenergieverbrauch übereinstimmen, zeigen, dass die Annahmen zu den Energieeinsparmaßnahmen nicht wie angenommen

umgesetzt worden sind, so dass keine unmittelbaren Auswirkungen auf den Endenergieverbrauch entstanden sind. Zum Beispiel wurden bis 2012 nur 59% der Bestandsgebäude im britischen Wohnungssektor mit zweischaligem Mauerwerk gedämmt [204] (in Szenarium B von BREHOMES wurden jedoch 80% bis 2013 angenommen). Weiterhin hatten laut EHS (English Housing Survey) bis 2012 nur 79% der Gebäude Fenster mit Doppelverglasung [205] (in Szenarium B von BREHOMES wurde 100% bis 2013 angenommen). Dies zeigt, dass die Annahmen der Szenarien von einer Entwicklung des Endenergiebedarfs ausgegangen sind, die so nicht eingetreten ist.

Die zweite Prognose mit BREHOMES aus dem Jahr 2000 [188] enthält fünf neue Szenarien (C,D,E,F und G). Szenarium C berücksichtigt im Vergleich zu den Szenarien A und B eine Weiterentwicklung der Trends der Jahre 1990 bis 2000, Szenarium D betrachtet, ähnlich wie Szenarium B, zusätzlich den Einfluss von moderaten Energieeinsparmaßnahmen, wie z.B. die Verbesserung der Wärmedämmung von Bauteilen, eine Erhöhung des Anteils an Fenstern mit Doppelverglasung oder die Nutzung von Solarenergie für die Gewinnung von Warmwasser und die Erzeugung von Elektrizität. Szenarium E ist in Bezug auf die Maßnahmen dem Szenarium D ähnlich, berücksichtigt aber zusätzlich den Austausch aller Heizkesselarten zu Brennwertkesseln und die Integration von Kerndämmung in sämtlichen Gebäuden mit zweischaligem Mauerwerk. Die zwei verbleibenden Szenarien (F und G) betrachten zusätzliche Maßnahmen zur Energieeinsparung und zur Reduktion der Emission von Treibhausgasen, wie z.B. den Abriss von alten Gebäuden und den Bau von Neubauten in der sogenannten „Nullenergiehausbauweise“. Weiterhin wurde eine zusätzliche Wärmedämmung der Außenwände aller Gebäude angenommen und dass 50% der gesamten Gebäude eine elektrische Heizungsanlage mit einer Wärmepumpe besitzen.

Abb. 3.2 zeigt, dass die Szenarien C und D mit dem tatsächlich aufgetretenen Endenergieverbrauch bis 2010 annähernd übereinstimmen. Dies lässt sich zum einen mit dem vergleichsweise kurzen Zeitraum zwischen dem Basisjahr der Modellierung (2000) und den letzten verfügbaren statistischen Daten (2010) begründen, zum anderen aber auch dadurch, dass keine der Annahmen, die in den Szenarien als Maßnahme zur Energieeinsparung betrachtet wurden, unmittelbare Auswirkungen auf den Endenergieverbrauch aufweisen können. Abb. 3.2 zeigt weiterhin, dass die verbleibenden drei Szenarien (E, F und G), welche die Anwendung von zusätzlichen Energieeinsparmaßnahmen berücksichtigen, diejenigen Szenarien sind, die am wenigsten mit der tatsächlichen Entwicklung des Endenergieverbrauchs übereinstimmen. Dies zeigt, dass diese Szenarien lediglich eine theoretische Projektion des Endenergiebedarfs abbilden, der aber nur erreicht werden würde, wenn die korrespondierenden Energieeinsparmaßnahmen auch tatsächlich vollständig umgesetzt würden.

Vor dem Hintergrund der oben gemachten Ausführungen ist ein wichtiges Ziel dieser Arbeit daher die Überprüfung der Übertragbarkeit und Genauigkeit der zwölf bestehenden Modelle aus Tab. 3.1. Diese Überprüfung dient der Erstellung eines optimierten Prognosemodells. Außerdem sollen mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse und einer Monte-Carlo-Simulation die einflussreichsten Eingangsparameter bestimmt sowie die Unsicherheiten der Ergebnisse quantifiziert werden. Eine Klassifizierung bestehender Modelle bezüglich ihrer Eigenschaften wird im Abschnitt 3.2 vorgenommen.

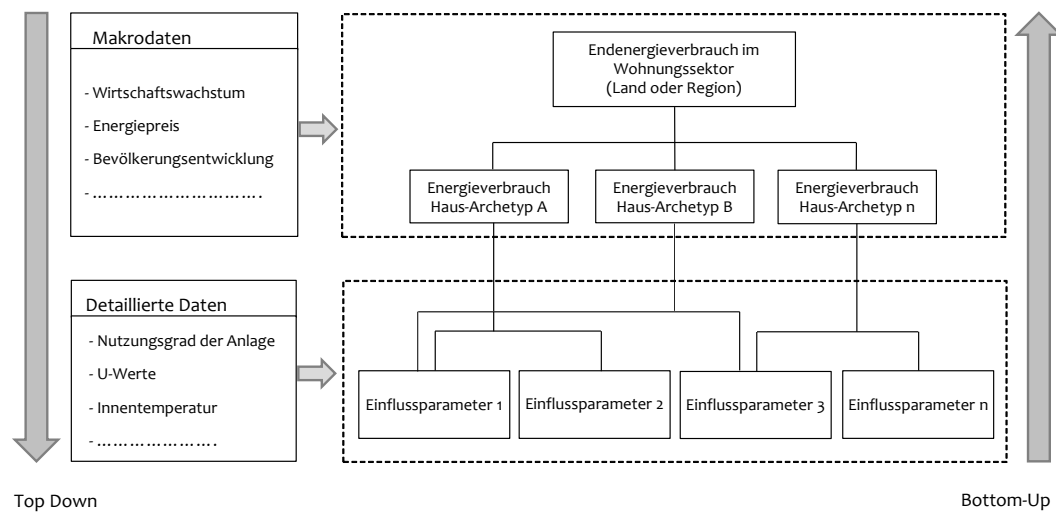
### 3.2 Klassifikationsansätze zur Einordnung bestehender Modelle

Die in Tab. 3.1 aufgelisteten Modelle unterliegen unterschiedlichen Modellierungsansätzen. Darüber hinaus unterscheiden sie sich hinsichtlich ihres Detaillierungsgrades, ihrer Berechnungsmethoden sowie der benötigten Eingangsparameter.

Basierend auf dem Entwicklungsansatz der Modelle kann eine Klassifizierung in Top-Down- und Bottom-Up-Modelle vorgenommen werden [206]. In dem Top-Down-Ansatz wird ein System zunächst als Ganzes ohne Angaben von Details betrachtet [28]. Hierauf wird jeder Teil des Systementwurfs weiter verfeinert und untergliedert. Bei Prognosemodellen im Wohnungssektor könnten dies zum Beispiel die Parameter Wirtschaftswachstum, Energiepreis oder Bevölkerungsentwicklung sein. Die so entstandenen neuen Teile werden dann durch neue Einflussfaktoren definiert, wie Einkommen pro Kopf, Export-Import-Energiepreise oder Lebenserwartung. Das System wird so lange untergliedert, bis eine klare Übersicht des Systems möglich ist. In der Bottom-Up-Modellierung werden zunächst die einzelnen Einflussfaktoren im Detail erfasst [207]. Sie werden dann miteinander verbunden und bilden so größere Komponenten. Diese Komponenten werden wiederum miteinander verknüpft und lassen so das gesamte System entstehen (Abb. 3.3).

Der Vorteil des „Top-Down“-Modellansatzes besteht darin, dass lediglich eine begrenzte Anzahl an statistischen Daten verknüpft werden muss, um das Modell zu erstellen [208]. Die erforderlichen Daten hierfür sind in der Regel leicht verfügbar [206]. Aufgrund der mangelnden Detaillierung ist jedoch keine Identifizierung des Einflusses möglich, den detailliertere Eingangsparameter auf das Gesamtsystem haben. Dies verhindert ein komplettes Verständnis für das zu analysierende Problem [28, 208]. Der Vorteil des „Bottom-Up“-Modellansatzes liegt darin, dass der Einfluss von detaillierten Eingangsparametern auf die Ausgangsparameter bestimmt werden kann [28, 208, 209]. Er hat jedoch den Nachteil, dass die benötigten, sehr detaillierten Eingangsparameter nicht immer zur Verfügung stehen [28].





**Abb. 3.3:** Allgemeiner Ansatz zur Entwicklung eines „Top-Down-“ und „Bottom-Up“-Modells

### 3.2.1 Statistische und bauphysikalische Bottom-Up-Modelle

Sämtliche Modelle, welche in dieser Arbeit analysiert werden, verwenden den „Bottom-Up“-Ansatz. „Bottom-Up“-Modelle zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor können in zwei Gruppen unterteilt werden: statistische oder bauphysikalische Modelle. Erstere gebrauchen statistische Informationen für die Eingangsparameter, letztere verwenden Berechnungen innerhalb des Modells, die auf physikalischen Eingangsparametern im Zusammenhang mit Mustergebäuden basieren [28].

Der statistische Bottom-Up-Ansatz, welcher bei fünf der zwölf untersuchten Modelle angewendet wird, betrachtet beispielsweise repräsentative Wohnungstypen oder Haus-Archetypen, welche mit statistischen Endenergieverbrauchskennwerten verbunden werden, wie den  $kWh/m^2a$ -Daten, wie sie in Deutschland von der Deutschen Energie-Agentur (DENA) für verschiedene Haus-Archetypen publiziert werden [210]. Diese Daten werden dann in Kombination mit Regressionsanalysen genutzt, um den zukünftigen Endenergiebedarf zu prognostizieren. Beispiele für diesen Modelltyp sind: LEAP, das FfE-Gebäudemodell und REM. Im bauphysikalischen Bottom-Up-Ansatz wird der Endenergiebedarf von repräsentativen Haus-Archetypen, beispielsweise für Raumwärme, direkt durch eine Energiebilanz zwischen Energiegewinnen, wie solaren Wärmegegewinnen oder internen Wärmegegewinnen (Bewohner, vorhandene Haushaltsgeräte) und Energieverlusten, wie Transmissionswärmeverlusten, Luftwechselrate oder Lüftungswärmeverlusten, mit Hilfe eines Kernrechners ermittelt. Beispiele hierfür sind die Kernrechner BREDEM-12 [38] für BREHOMES, EABS [21] für ECCABS und HOT2000 [40] für CREEM. In solchen Kernrechnern wird dann der spezifische Endenergiebedarf für Warmwasser in Relation

zur Anzahl der Bewohner oder in Bezug auf den Warmwasserbedarf pro  $m^2$  Wohnfläche berechnet. Hierbei werden Wärmeverluste im Warmwasserspeicher und der Wasserverteilung berücksichtigt (s. Berechnungsmethode in Unterabschnitt 3.3.2). Alle Modelle, welche diesen Ansatz verwenden, d.h. bauphysikalische Bottom-Up-Modelle, nutzen eine begrenzte Anzahl von Mustergebäuden (Haus-Archetypen), die eine bestimmte Menge an Gebäuden im gesamten Wohnungssektor repräsentieren.

### 3.2.2 Ansätze für eine detailliertere Klassifikation bestehender Modelle

Zur Erleichterung des Vergleichs zwischen Modellen wurden in den vergangenen Jahren, zusätzlich zu den oben beschriebenen grundlegenden Klassifikationsansätzen, verschiedene detaillierte Kategorisierungen von bestehenden Modellen vorgenommen. Hierbei wurden jedoch unterschiedliche Kriterien verwendet, aufgrund derer Modelle je nach Ansatz der Kategorisierung verschiedenen übergeordneten Kategorien zugeordnet werden. Nakata hat zum Beispiel ökonomische Modelle analysiert und das Model LEAP als ein „Fixed Coefficient Model“ eingruppiert [211]. Dagegen klassifizierten Bhattacharyya und Govinda (2010) dasselbe Modell (LEAP) als ein „Bottom-up Optimisation/Accounting Modell“ [212].

In dieser Arbeit basieren die Kriterien zur detaillierten Klassifizierung der zwölf Modelle hauptsächlich auf den Arbeiten von Kavacic et al. [28] sowie Swan und Ugursal [58]. Dies lässt sich unter anderem mit der Menge an aktuellen Informationen (Klassifizierung der aktuellen Modellansätze, allgemeine Beschreibung von bestehenden Modellen) begründen, die in diesen Studien berücksichtigt werden. Weiterhin werden vier der in diesen Studien betrachteten Modelle (BREHOMES, CREEM, REM, CDEM) auch in dieser Arbeit untersucht. Tab. 3.2 gibt einen Überblick über die Hauptcharakteristika der 12 berücksichtigten Modelle, wobei Modelle mit ähnlichen Charakteristika zusammengefasst werden. LEAP und MAED-2 zum Beispiel sind zwei statistische Bottom-Up-Modelle mit ähnlichen Modellierungsansätzen (siehe Anhang D), welche die Möglichkeit eröffnen, den Endenergieverbrauch eines beliebigen Landes zu bestimmen. Sie werden daher zusammen aufgeführt. Die Modelle BSM und das FfE-Gebäudemodell hingegen wurden auf einer gemeinsamen Grundlage entwickelt, um den Endenergieverbrauch speziell in Deutschland zu bestimmen. Die Modelle CDEM und BREHOMES, die in Tab. 3.2 ebenfalls zusammengefasst aufgeführt werden, verwenden verschiedene Versionen des gleichen Kernrechners (BREDEM), während die Modelle DECM und CHM beide auf SAP basierende Modelle sind.

Wie bereits in Abschnitt 3.1 angedeutet, können bestimmte Modelle aufgrund ihrer Fähigkeit, den Endenergiebedarf eines beliebigen Landes zu bestimmen, als „Universal-Modell“

**Tab. 3.2:** Vergleichende Zusammenfassung der Hauptcharakteristika der 12 untersuchten Modelle, geordnet nach Modellansatz in bottom-up statistische und bottom-up bauphysikalische Modelle

	Bottom-up statistische Modelle			Bottom-up bauphysikalische Modelle				
	LEAP/ MAED-2	BSM/ FfE-Gebäudemodell	REM	ECCABS	CDEM/ BREHOMES	DECM/ CHM	CREEM	REEPS
<b>Anwendungsgebiet</b>								
Universell einsetzbar	X							
spezifisches Land (Nation)		X (Deutschland)	X (Finnland)	X (Schweden)	X (England/UK)	X (England/UK)	X (Kanada)	X (USA)
<b>Anwendungsebene</b>								
Regional	X		X			X	X	X
National	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Sektor der Anwendung</b>								
Wohnungssektor	X	X	X	X	X	X	X	X
andere Sektoren	X							
<b>Detaillierungsgrad</b>								
	Nicht bestimmt <sup>1</sup>	80 Haus-Archetypen <sup>2</sup> / 70 Haus-Archetypen <sup>2</sup>	4163 Gebäude-einheiten <sup>3</sup>	300 Haus-Archetypen <sup>2</sup>	47 Haus-Archetypen/ 1000 Haus-Archetypen <sup>2</sup>	50 Haus-Archetypen <sup>2</sup> / 14.951 repräsentative Wohnungstypen	8767 Haus-Archetypen <sup>2</sup>	8 Haus-Archetypen <sup>2</sup>
<b>Aufschlüsselungsgrad der Eingangsparameter</b>								
	niedrig/mittel	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
<b>Ausgangsparameter</b>								
Endenergiebedarf	X	X	X	X	X	X	X	X
CO <sub>2</sub> -Emissionen	X		X	X	X	X	X	

<sup>1</sup> Aufgrund der universellen Einsetzbarkeit dieser Modelle ist es nicht möglich, einen bestimmten Detaillierungsgrad zu benennen, da der Anwender den Detaillierungsgrad selbst festlegen muss.

<sup>2</sup> Der Begriff „Haus-Archetypen“, welcher in dieser Arbeit verwendet wird, umfasst verschiedene ursprünglich von den Entwicklern der untersuchten Modelle verwendete Begriffe: Gebäudekategorien, Haus-Archetypen, Wohn- und Gebäudetypen.

<sup>3</sup> „Gebäudeeinheiten“ sind kommunal aggregierte Gruppen von Gebäuden mit einem ähnlichen Raumwärmeverbrauch.

klassifiziert werden. Wie in der Tab. 3.2 aufgezeigt wird, können zwei der zwölf analysierten Modelle universell eingesetzt werden (MAED-2, LEAP), während die übrigen Modelle (BREHOMES, CDEM, CREEM, ECCABS, FfE-Gebäudemodell, BSM, REEPS, CHM, DECM und REM) dafür entwickelt wurden, den Energieverbrauch eines spezifischen Landes zu bestimmen.

Der Endenergieverbrauch auf regionaler Ebene (z.B. der Endenergieverbrauch pro  $m^2$  nach Haus-Archetypen) kann sich vom nationalen Durchschnitt des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor stark unterscheiden [213]. Aus diesem Grund gibt es momentan einen Trend in der Modellentwicklung zur Berechnung des Endenergiebedarfs im Wohnungs-

sektor nach Regionen, Zonen oder sogar Städten [24, 59]. Dies wird in Tab. 3.2 deutlich, die zeigt, dass sieben der untersuchten Modelle (LEAP, MAED-2, DECM, CHM, REM, CREEM und REEPS) dafür geeignet sind, den Endenergiebedarf auf regionaler Ebene zu bestimmen. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass auf Grundlage der hiermit erzielten Ergebnisse die Möglichkeit eröffnet wird, eine lokale Energiepolitik in Bezug auf eine spezifische Region oder Stadt zu entwickeln. Darüber hinaus ermöglicht dieser Modell-Typ die Unterteilung des nationalen Endenergiebedarfs in seine regionalen Anteile, was zum Beispiel beim Vorhandensein von verschiedenen Klimazonen in einem Land sinnvoll sein kann. Die aufgrund der Unterteilung der Eingangsparameter auf die regionale Ebene erforderliche große Datenmenge kann jedoch dazu führen, dass sich der Modellierungsprozess verlangsamt, wenn der Endenergiebedarf im Wohnungssektor eines gesamten Landes bestimmt werden soll.

### 3.2.3 Die Rolle des Detaillierungsgrades für die Modellierung

Die meisten Modelle, welche hier betrachtet werden, wurden speziell dafür entwickelt, den Endenergieverbrauch im Wohnungssektor zu prognostizieren. Die Modelle LEAP und MAED-2 können jedoch auch den Endenergieverbrauch in anderen Sektoren, zum Beispiel den Sektoren Industrie, Verkehr und GHD bestimmen. Dies hat den Vorteil, dass sich hierdurch die möglichen Auswirkungen von energiepolitischen Maßnahmen in verschiedenen Sektoren gleichzeitig beurteilen lassen. Der Nachteil dieser Modelle ist jedoch, dass sie in der Regel einen niedrigen Detaillierungsgrad haben. Das bedeutet, dass der Einfluss von detaillierten Eingangsparametern, z.B. die Verbesserung der Wärmedämmung von Außenwänden oder die Änderung der Fensterverglasung durch beispielsweise einen Wechsel von Einzel- zu Doppelverglasung, nicht direkt im Modell betrachtet werden kann. Im Gegensatz dazu sind Modelle, die allein auf den Wohnungssektor zugeschnitten sind, wie BREHOMES, CDEM, CREEM und REEPS, gut für die Beurteilung der Auswirkungen von detaillierten Eingangsparametern auf die Ergebnisse geeignet.

In Abhängigkeit von der Menge an verwendeten Daten zur Aufstellung einer Modellierung, das heißt dem Aufschlüsselungsgrad der Eingangsparameter, unterscheiden sich die Modelle in ihrem Detaillierungsgrad [28]. Von den hier betrachteten Modellen ist das Modell mit dem höchsten Detaillierungsgrad das CHM-Modell, welches den gesamten englischen Wohnungsbestand in 14.951 repräsentative Wohnungstypen unterteilt. Jeder dieser Wohnungstypen repräsentiert hierbei eine bestimmte Anzahl an Wohnungen, die insgesamt die 22,8 Mio. Wohnungen in England im Jahr 2011 repräsentieren [42]. Zu den Modellen mit einem mittleren Detaillierungsgrad gehört das Modell CDEM. Dies ist ein Modell, welches den englischen Wohnungsbestand anhand der Gebäudeform und der Altersgruppe in 47 Haus-Archetypen untergliedert. Das Modell mit dem geringsten Detaillierungsgrad ist

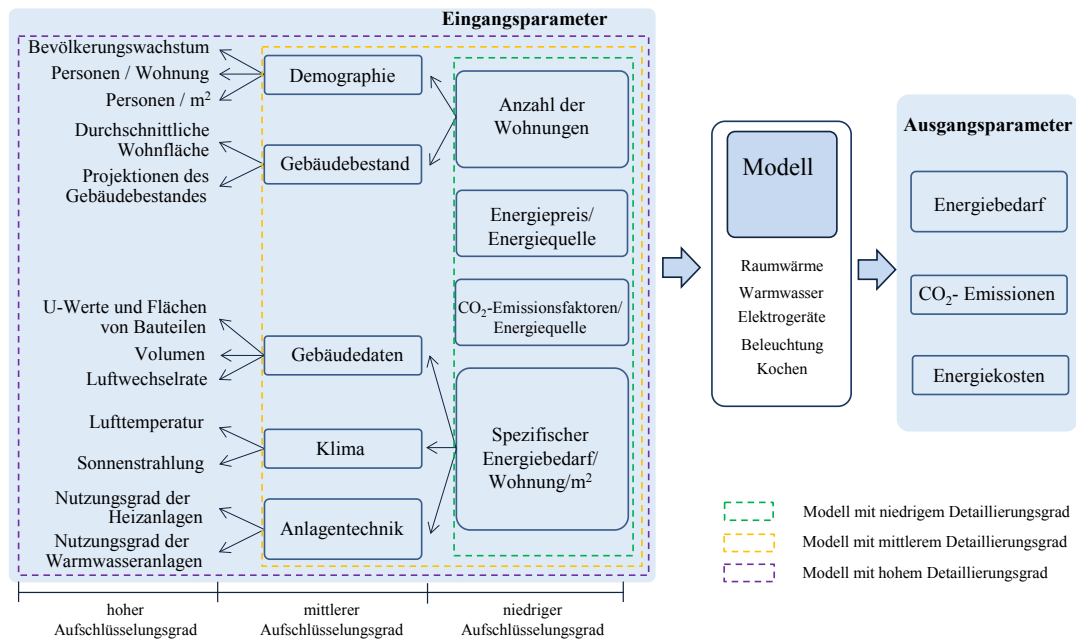
LEAP. LEAP gliedert den Endenergieverbrauch im Wohnungssektor anhand der Anzahl der Wohnungen sowie nach verschiedenen Nutzungsbereichen (Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasserbereitung, Beleuchtung und Geräte), den verwendeten Energiequellen und dem Nutzungsgrad der Anlagen und Geräte.

Wie in Tab. 3.2 deutlich wird, unterteilen die Entwickler der hier betrachteten Modelle den Wohnungsbestand in der Regel in repräsentative Wohnungs- oder Haus-Archetypen, deren Auswahlkriterien jedoch untereinander variieren. Wie in Tabelle 3-2 gezeigt wird, gliedert zum Beispiel CREEM den kanadischen Wohnungsbestand in 16 „Haus-Archetypen“, welche durch vier Regionen (Western Canada, Prairies, Central Canada, Atlantic Canada) und vier Altersgruppen (vor 1941, 1941-1960, 1961-1977, nach 1978) unterschieden werden [18]. BREHOMES hingegen gliedert den britischen Wohnungsbestand in über 1000 „Kategorien“, welche durch Altersgruppe, Gebäudeform und dem Besitz von Zentralheizung bestimmt werden. Das Modell BSM wiederum gliedert den deutschen Wohnungsbestand in verschiedene „Gebäudetypen“ (Einfamilienhäuser, Zweifamilienhäuser, kleine und große Mehrfamilienhäuser) und acht Altersgruppen sowie zusätzlich bis zum Jahr 2010 nach der Lage in West- oder Ostdeutschland. Zur Vereinheitlichung wird im Folgenden die Bezeichnung „Haus-Archetyp“ als kollektive Bezeichnung für verschiedene Hausklassifizierungen verwendet, da ihr Verwendungszweck der gleiche ist, unabhängig von den genauen Auswahlkriterien (siehe auch Tab. 3.2).

Abb. 3.4 zeigt eine schematische Übersicht der grundlegenden Eingangsparameter mit verschiedenen Aufschlüsselungsgraden für Prognosemodelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Der Begriff Aufschlüsselungsgrad wird in dieser Arbeit zur Unterteilung und Kategorisierung von Eingangsparametern verwendet. Zum Beispiel wird der übergeordnete Eingangsparameter „spezifischer Endenergiebedarf pro Wohnung“ durch weitere Parameter, die diesen bestimmen und beeinflussen, wie Klima, Gebäudedaten, Anlagentechnik, „aufgeschlüsselt“. Der Begriff Detaillierungsgrad wird in dieser Arbeit im Zusammenhang mit der Charakterisierung eines Modells durch die gesamte Anzahl an Eingangsparametern verwendet. Modelle mit hohem Detaillierungsgrad unterteilen das gesamte energetische System in eine hohe Anzahl von Eingangsparametern, dagegen unterteilen Modelle mit niedrigem Detaillierungsgrad das System in übergeordnete Eingangsparameter und berücksichtigen daher nur eine geringere Anzahl an Einflussfaktoren.

Wie die Abb. 3.4 zeigt, lassen sich drei Niveaus der Aufschlüsselung der Eingangsparameter (niedriges, mittleres und hohes Niveau) ableiten, welche in direkter Beziehung zum Detaillierungsgrad des Modells stehen.

Modelle mit einem niedrigen Detaillierungsgrad, wie LEAP, BSM, oder REM benötigen typischerweise zur Bestimmung des Endenergiebedarfs Eingangsparameter ohne ho-



**Abb. 3.4:** Schaubild zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Niveaus im Detaillierungsgrad grundlegender Eingangsparameter für Prognosemodelle im Wohnungssektor

hen Aufschlüsselungsgrad, wie z.B. die Eingangsparameter „Anzahl an Gebäuden“ und „spezifischer Endenergieverbrauch“ für unterschiedliche Nutzungsbereiche (Raumwärme, Warmwasser, Geräte und Beleuchtung). Hingegen wird für Modelle mit einem mittleren Detaillierungsgrad die Anzahl an bestehenden Wohnungen unter dem Gesichtspunkt des spezifischen Endenergieverbrauchs in Haus-Archetypen untergliedert, um den Endenergiebedarf zu prognostizieren. Modelle mit einem hohen Detaillierungsgrad, z.B. CDEM oder BREHOMES, verwenden Eingangsparameter mit einem hohen Aufschlüsselungsgrad, wie die Innentemperatur, U-Werte, die solare Einstrahlung oder die Luftwechselrate.

### 3.2.4 Modellierung von Energie-Umwelt-Interaktionen

Seit den 1990er Jahren wurden verschiedene Modelle entwickelt, um die Auswirkungen der Freisetzung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Verbrauch von Energie auf die Umwelt zu beurteilen [212]. Diese Modelle zeigen, dass eine direkte Beziehung zwischen den Faktoren besteht, die den Endenergieverbrauch im Wohnungssektor kennzeichnen, und den dadurch entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen [24, 62, 185]. Einige der Modelle, welche in der Tab. 3.2 gezeigt werden, ermöglichen es, die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Relation zum Endenergieverbrauch im Wohnungssektor zu quantifizieren. Allerdings benötigen diese Modelle

zusätzliche Daten in Form von Emissionsfaktoren und Primärenergiefaktoren<sup>5</sup> als Eingangsparameter. Diese sind eine Funktion der verwendeten Energiequellen. Zum anderen werden die genauen Anteile der Energiequellen (Brennstoffe) am gesamten Primärenergieverbrauch benötigt, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnen zu können.

### **3.3 Modelleingangsparameter und benötigte Daten zur Bestimmung des aktuellen Endenergieverbrauchs und zukünftigen Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor**

Zur Bestimmung des aktuellen Endenergieverbrauchs und des zukünftigen Endenergiebedarfs benötigen die hier untersuchten Modelle unterschiedliche Mengen an Daten mit einem unterschiedlichen Aufschlüsselungsgrad. Der Einfluss der Modelleingangsparameter auf den modellierten Endenergiebedarf wurde in den letzten Jahren vielfach diskutiert [16, 26, 27, 61, 185]. Grund ist die Diskrepanz zwischen den benötigten und den verfügbaren Daten [16, 27] sowie die Unsicherheit der Ergebnisse der Modelle aufgrund der inhärenten Unsicherheit der Eingangsparameter [26, 61, 185].

Die Faktoren, die den Endenergieverbrauch in Gebäuden beeinflussen, sind in erster Linie folgende: das Klima (Außentemperatur, solare Einstrahlung, Luftgeschwindigkeit), Gebäudeeigenschaften (Gebäudetyp, Wohnfläche, Orientierung), Kühl- oder Heizungssysteme (Raumheizung und -kühlung, Warmwasserbereitung) und das Nutzerverhalten [174]. Betrachtet man jedoch den gesamten Wohnungssektor, dann spielen neben diesen Faktoren auch noch andere Eingangsparameter eine Rolle. Wichtige Einflussfaktoren sind die Bevölkerungsentwicklung, das Klima, die Anzahl der Wohnungen, der Nutzungsgrad der Anlagen/Geräte sowie ökonomische Faktoren (Energiepreis, Pro-Kopf-Einkommen). Außerdem verändern sich die Einflussfaktoren für den Endenergieverbrauch im Wohnungssektor über einen längeren Zeitraum hinweg. In Deutschland sind zum Beispiel in den letzten zwei Jahrzehnten die Einfuhrpreise von Erdgas im Vergleich zum Basisjahr 1991 gestiegen. Bezogen auf einen Preisindex von 100 im Basisjahr 1991 ist für die Einfuhr von Erdgas bis zum Jahr 2011 ein Anstieg des Index auf 297<sup>6</sup> zu verzeichnen [214].

Für die bestehenden Modelle, die in dieser Arbeit analysiert werden, wurden zwei Hauptgruppen von Eingangsparametern identifiziert. Dies sind zum einen die Anzahl der Gebäude bzw. Wohnungen und zum anderen der spezifische Endenergiebedarf je Wohnung

---

<sup>5</sup>Ein „Primärenergiefaktor“ zeigt das Verhältnis der eingesetzten Primärenergie zur abgegebenen Endenergie.

<sup>6</sup>Ein Preisindex von 297 bedeutet eine 197%ige Steigerung gegenüber dem Basisjahr.

bzw. pro  $m^2$  Wohnfläche. Jede dieser Gruppen wird weiter in Abhängigkeit des Aufschlüsselungsgrades der Eingangsparameter des jeweiligen Modells unterteilt (Abb. 3.4). Außerdem gibt es zwei sekundäre Gruppen von Eingangsparametern: Energiepreise und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren, welche die Modelle als zusätzliche Information verwenden, um die Entwicklung der Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen zu quantifizieren. Im Folgenden werden diese Gruppen von Eingangsparametern vor dem Hintergrund der verschiedenen Modellierungsansätze diskutiert und ausgewertet. Dies geschieht zur Veranschaulichung der jeweils notwendigen Eingangsparameter auf Basis der Datenlage in Deutschland, da wie in Kapitel 1 und 2 erwähnt wurde, der deutsche Wohnungssektor in der vorliegenden Arbeit als Fallstudie zur Analyse und Überprüfung der bestehenden Modelle betrachtet wird.

### 3.3.1 Anzahl der Gebäude bzw. Wohnungen

Allgemein betrachtet kann festgehalten werden, dass der Grad der Detaillierung der Modelle in Bezug auf die Bestimmung des spezifischen Endenergiebedarfs je Wohnung nicht unbedingt mit dem Detaillierungsgrad der Modelle in Bezug auf die Bestimmung der Anzahl der Gebäude oder Wohnungen übereinstimmt. Es gibt z.B. Modelle wie BSM, die keinen hohen Detaillierungsgrad in Bezug auf die Bestimmung des spezifischen Endenergiebedarfs je Wohnung haben, jedoch in Bezug auf die Bestimmung der Anzahl der Gebäude oder Wohnungen einen hohen Detaillierungsgrad besitzen, da der übergeordnete Eingangsparameter „Anzahl der Gebäude/Wohnungen“ durch Eingangsparameter, die diesen bestimmen und beeinflussen, wie Personen pro Wohnung, Bevölkerungsentwicklung, Anzahl der Neubauten auf Basis demografischer Faktoren und Ersatzbau, aufgeschlossen wird. Dagegen gibt es Modelle wie z.B. BREHOMES, die einen hohen Detaillierungsgrad in Bezug auf die Bestimmung des spezifischen Endenergiebedarfs je Wohnung besitzen, aber in Bezug auf die Bestimmung der Anzahl der Wohnungen keinen hohen Detaillierungsgrad aufweisen. In BREHOMES wird die Anzahl der Wohnungen auf Basis von Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung und der durchschnittlichen Anzahl der Bewohner pro Wohnung berechnet. Das einzige Modell, das sowohl einen ähnlichen Detaillierungsgrad in Bezug auf die Bestimmung des gesamten Endenergiebedarfs als auch der Gebäude/Wohnungen hat, ist LEAP. Alle anderen Modelle benötigen eine spezifische Beschreibung und Klassifizierung.

LEAP hat einen niedrigen Detaillierungsgrad zur Bestimmung der zukünftigen Anzahl der Wohnungen sowie des spezifischen Endenergiebedarfs je Wohnung. Hierbei werden in



LEAP mathematische Funktionen, die eine Projektion von Tendenzen aus der Vergangenheit betrachten, verwendet. Diese Tendenzen sind hierbei jedoch nicht automatisch durch die eingegebenen Modelldaten vorgegeben. In LEAP werden beispielsweise oft Tendenzen durch Dateninterpolation, wie eine lineare Projektion mit einer Wachstumsrate, eine Heaviside-Funktion, geglättete Kurven, Exponentialprojektionen oder Logistic Forecasts, ermittelt. Außerdem gibt es für den Nutzer die Möglichkeit, bei Bedarf eine Funktion einzugeben, die eine möglichen Entwicklung der Anzahl der Wohnungen beschreiben kann. Für dieses Modell werden in den folgenden Kapiteln Daten zur Anzahl der Wohnungen des Deutschen Statistischen Bundesamts (DESTATIS) verwendet, welche jährlich im sogenannten Bericht „Bestand an Wohnungen – Fachserie 5“ [23] publiziert werden. Hierbei wird insbesondere der Teil „Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden, Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden, Lange Reihen ab 1969–2013“ [23] betrachtet (s. Anhang C, Abschnitt C.4). In dieser Arbeit wurde für die Modellierung mit LEAP die Funktion Wachstumsrate (Growth rate, GR) verwendet (Gleichung 3.1), da diese Funktion mit einer Wachstumsrate von 1,3% im Referenzzeitraum den kleinsten Abweichungsfehler im Vergleich zu anderen Funktionen (Exponentialprojektionen, Logistic Forecasts) von LEAP aufweist (<3%).

$$AW_{tot}(t) = AW_{t_R} \cdot \left[ 1 + \frac{GR}{100} \right]^{(t-t_R)} \quad (3.1)$$

$$t > t_R$$

mit:

$AW_{tot}(t)$  – gesamte Anzahl der Wohnungen im Jahr  $t$

$AW_{t_R}$  – Anzahl der Wohnungen im Referenzjahr  $t_R$

$GR$  – Wachstumsrate

Bei Berechnungsmethoden mit mittlerem Detaillierungsgrad in Bezug auf die Bestimmung der Anzahl der Gebäude/Wohnungen, werden zur Bestimmung der zukünftigen Anzahl der Gebäude typischerweise lineare Projektionen für die Wachstumsrate verwendet. Die gesamte Menge der Gebäude wird aber zusätzlich nach Haus-Archetypen und Baujahr unterteilt (Gleichung 3.2). Diese Berechnungsmethode wird in den Modellen REM, REEPS und dem FfE-Gebäudemodell verwendet.

$$GB_{a,s}(t) = GB_{t_R,a,s} \cdot \left[1 + \frac{GR}{100}\right]^{(t-t_R)} \quad (3.2)$$

mit:

$GB_{a,s}(t)$  – Anzahl der Gebäude im Jahr  $t$  nach Baujahr und Haus-Archetyp

$GB_{t_R,a,s}$  – Anzahl der Gebäude im Referenzjahr  $t_R$  nach Baujahr und Haus-Archetyp

$a$  – Baujahr

$s$  – Haus-Archetyp

In dieser Arbeit werden für Haus-Archetypen Daten aus der Studie des Institutes für Wohnen und Umwelt (IWU) „Deutsche Gebäudetypologie“ [17, 41, 215] verwendet. Das Institut für Wohnen und Umwelt hat mit dieser Publikation eine Datenbasis zur deutschen Gebäudetypologie entwickelt, welche den deutschen Wohngebäudebestand nach Baujahr und Gebäudetyp, in 44 Klassen unterteilt (s. Anhang C, Abschnitt C.5). Die Anzahl von Wohnungen nach Haus-Archetypen (Einfamilienhaus, Reihenhaushaus, Mehrfamilienhaus, großes Mehrfamilienhaus) wird nach Baualtersklassen in Abb. 3.5 dargestellt.

Mit den Berechnungsmethoden von MAED-2 oder BREHOMES wird die Anzahl der Wohnungen anhand der Personen pro Wohnung bzw. Wohnfläche und der Bevölkerungsentwicklung bestimmt. In MAED-2 zum Beispiel wird die Anzahl der Wohnungen im jeweiligen Land mit Hilfe der Gleichung 3.3 berechnet. Dazu werden die Populationsgröße und die durchschnittliche Anzahl der Bewohner pro Wohnung herangezogen. Die Bevölkerungsentwicklung in MAED-2 hängt hierbei vom durch den Nutzer bestimmten Szenarium und dem betrachteten Zeitraum ab. Die Projektionen der Szenarien werden auf Grundlage von Prognosen der Wachstumsraten im Referenzzeitraum entwickelt.

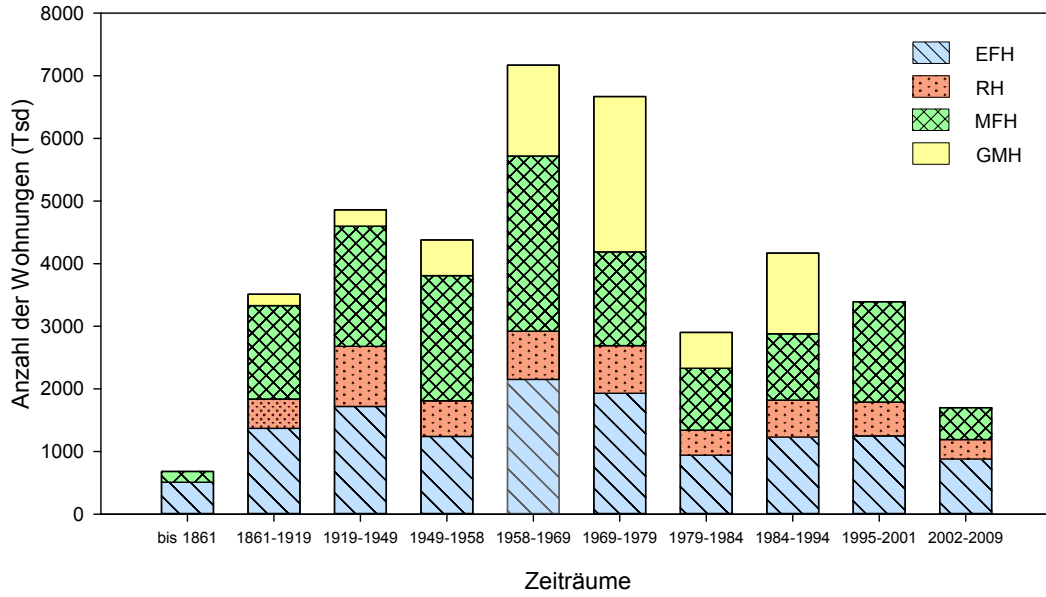
$$AW_{tot}(t) = \frac{P_{t_R} \cdot \left(1 + \frac{GR}{100}\right)^{(t-t_R)}}{P_{we}} \quad (3.3)$$

mit:

$AW_{tot}(t)$  – gesamte Anzahl der Wohnungen im Jahr  $t$

$P_{t_R}$  – Bevölkerungszahl im Referenzjahr  $t_R$

$P_{we}$  – Personen pro Wohnung



**Abb. 3.5:** Anzahl der Wohnungen im deutschen Wohngebäudebestand nach Baujahr und Gebäudetyp. EFH: Einfamilienhaus, RH: Reihenhaushaus, MFH: Mehrfamilienhaus, GMH: großes Mehrfamilienhaus. Datenquelle: [41]

Ähnlich wie MAED-2, berechnet BREHOMES die Anzahl der Wohnungen auf Grundlage von Prognosen für die Bevölkerungsentwicklung und der durchschnittlichen Anzahl der Bewohner pro Wohnung. Hierbei wird mit Hilfe von BREDEM, dem Kernrechner von BREHOMES, die Anzahl der Nutzer ( $N$ ) mit Hilfe der Gleichung 3.4 und Gleichung 3.5 in Relation zur Wohnfläche ( $WF$ ) berechnet. Für Deutschland wurde im Rahmen von Studien zur „deutschen Gebäudetypologie“ eine durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnung von  $91 \text{ m}^2$  ermittelt [215]. Diese durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnung nach Haus-Archetyp  $s$  wird dann verwendet, um die Anzahl der Nutzer pro Wohnung in einem Referenzjahr  $t_R$  zu bestimmen (Gleichung 3.4 oder Gleichung 3.5). Danach wird zur Prognose der gesamten Anzahl der Wohnungen im Jahr  $t$  die Gleichung 3.6 verwendet.

$$N = 0,0365 \cdot WF - 0,00004145 \cdot WF^2 \quad \text{für } WF \leq 450 \text{ m}^2 \quad (3.4)$$

$$N = \frac{9}{\left(1 + \frac{1 + 54,3}{WF}\right)} \quad \text{für } WF > 450 \text{ m}^2 \quad (3.5)$$

$$AW_{tot}(t) = \frac{P(t) \cdot AW_{tot,t_R}}{\sum_{i=1}^z N_i \cdot AW_{t_R,s}} \quad (3.6)$$

mit:

$WF$  – Wohnfläche

$N_i$  – Anzahl der Nutzer nach Haus-Archetyp  $s$  im Referenzjahr  $t_R$

$P(t)$  – Bevölkerungszahl im Jahr  $t$

$AW_{tot,t_R}$  – Gesamte Anzahl der Wohnungen im Referenzjahr  $t_R$

$AW_{t_R,s}$  – Anzahl der Wohnungen im Referenzjahr  $t_R$  nach Haus-Archetyp  $s$

Obwohl das Modell BSM im Hinblick auf die Bestimmung des spezifischen Endenergiebedarfs je Haus-Archetyp keinen hohen Detaillierungsgrad aufweist, besitzt es bezüglich der Bestimmung der Anzahl der Gebäude den höchsten Detaillierungsgrad von allen in dieser Arbeit betrachteten Modellen. In BSM wird der deutsche Gebäudebestand in zehn Baualtersklassen aufgegliedert (vor 1919, 1919-1948, 1949-1957, 1958-1968, 1969-1978, 1979-1983, 1984-1990, 1991-1995, 1996-2000, 2001-2010). Hierfür werden Daten der Studie des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung [12], Daten des IWU [41] sowie eine detaillierte Datenerhebung zum Wohnungsbestand aus der Mikrozensus-Umfrage von 2006 in Deutschland [216] verwendet. In diesen Studien wurde der deutsche Gebäudebestand in fünf Haustypen (Einfamilienhaus (EFH), Zweifamilienhaus (ZFH), Mehrfamilienhaus (MFH), großes Mehrfamilienhaus (GMFH) und Hochhaus (HH)) unterteilt. Der Gesamtgebäudebestand im Jahr  $t$  wird aus dem Gebäudebestand im Referenzjahr  $t_R$  ermittelt, unter Berücksichtigung der Anzahl der abgerissenen Gebäude im Jahr  $t$  sowie der Anzahl der Neubauten auf Basis demografischer Faktoren und Ersatzbau (Gleichung 3.7). Zur Bestimmung der zukünftigen Neubauten auf Basis demografischer Faktoren und Ersatzbau wurden durch die Autoren des BSM-Modells Prognosen aus verschiedenen Studien [11-14] berücksichtigt. Die erstellten Prognosen besagen, dass die Anzahl der Neubauten auf Basis demografischer Faktoren im deutschen Wohnungssektor mit einer jährlichen Wachstumsrate von mehr als 0,25% weiter steigen wird. Die Zahl der Ersatzbauten ist ebenfalls prognostiziert um 0,2% jährlich zu steigen.

$$\begin{aligned}
 GB_{tot,s,r}(t) = & \sum_a (GB_{a,s,r,t_R} - A_{meb,a,s,r}(t) - A_{oeb,a,s,r}(t)) + \\
 & + \sum_{2010}^z NB_{df,s,r}(t) + \sum_{2010}^z NB_{eb,s,r}(t) \\
 & \forall z \in \{2010, \dots, 2050\}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

mit:

- $GB_{tot,s,r}(t)$  – gesamte Anzahl der Gebäude im Jahr  $t$
- $GB_{a,s,r,t_R}$  – Anzahl der Gebäude im Referenzjahr  $t_R$
- $A_{meb,a,s,r}(t)$  – Abriss mit Ersatzbau im Jahr  $t$
- $A_{oeb,a,s,r}(t)$  – Abriss ohne Ersatzbau im Jahr  $t$
- $NB_{df,s,r}(t)$  – Neubauten auf Basis demografischer Faktoren
- $NB_{eb,s,r}(t)$  – Neubauten Ersatzbau
- $a$  – Baujahr
- $s$  – Haus-Archetyp
- $r$  – Region

### 3.3.2 Spezifischer Endenergiebedarf

Die zweite wichtige Gruppe von Eingangsparametern bezieht sich auf den spezifischen Endenergiebedarf der Haus-Archetypen oder Wohnungstypen nach Nutzungsbereichen (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung). Die Bottom-Up statistischen Modelle verwenden hierbei statistische Daten der vergangenen Jahre zum Endenergieverbrauch (Endenergieverbrauchskennwerte) der einzelnen Haus-Archetypen oder Wohnungstypen. Die Bottom-Up bauphysikalischen Modelle verwenden hingegen einen Kernrechner (z.B. BREDEM-12, EABS oder HOT2000), der den Endenergiebedarf für einen repräsentativen Haus-Archetyp oder Wohnungstyp bestimmen kann. Dafür benötigen die Kernrechner detaillierte Informationen zur Bauweise der einzelnen Haus-Archetypen, wie die durchschnittliche Wohnfläche, U-Werte und die Fläche von Bauteilen, das Gebäudevolumen oder die Luftwechselrate. Weiterhin müssen Informationen zum Klima (z.B. Lufttemperatur, solare Einstrahlung) und zur Anlagentechnik (z.B. Nutzungsgrad der Anlagen/Geräte) eingegeben werden. Im Folgenden werden typische Berechnungsmethoden für verschiedene Nutzungsbereiche dargestellt.

### 3.3.2.1 Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme $EEB_{rw}$

Das statistische Modell mit dem geringsten Detaillierungsgrad (LEAP) benötigt Daten zum Nutzenergieverbrauch für Raumwärme ( $rw$ ) für eine durchschnittliche Wohnung  $NEVK_{rw,q}$  und den Nutzungsgrad  $n_q$  für die Heizanlagen in Relation zur Energiequelle ( $q$ ). Der gesamte Endenergiebedarf für Raumwärme wird durch die Summe der Multiplikation der Anzahl der Wohnungen mit dem Quotienten aus dem Nutzenergieverbrauch und dem Nutzungsgrad, unterteilt nach Energiequelle ( $q$ ), ermittelt (Gleichung 3.8).

$$EEB_{rw}(t) = \sum AW_q(t) \cdot \frac{NEVK_{rw,q}}{n_q} \quad (3.8)$$

Die benötigten Daten (Anzahl der Wohnungen, Nutzenergieverbrauch, Energiequelle) zur Bestimmung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme mit LEAP wurden der Studie „Energieeffizienz in Zahlen“ vom IWU [151] und DESTATIS [23] entnommen (Anhang C, Abschnitt C.7). Um mit LEAP die Auswirkungen der Entwicklung der Anlagentechnik im Prognosemodell abbilden zu können, ist es notwendig, Daten zur Entwicklung des Nutzungsgrades von Anlagen bzw. des Wirkungsgrades der Haushaltgeräte in Deutschland zu verwenden. Diese Informationen wurden wie in Abschnitt 2.3 gezeigt ermittelt und sind im Detail in Anhang C, Abschnitt C.2 dargestellt.

Modelle mit mittlerem Detaillierungsgrad, wie REM oder das FfE-Gebäudemodell, verwenden prinzipiell einen vergleichbaren Ansatz wie LEAP. Der Unterschied liegt jedoch in der Unterteilung des Gebäudebestandes. Anstatt von einer einzelnen durchschnittlichen Wohnung auszugehen, werden der Gebäudebestand und damit die Nutzenergieverbrauchskennwerte nach Haus-Archetypen  $GB_{a,s}$  unterteilt (Gleichung 3.9). Außerdem ist zu beachten, dass der Nutzungsgrad nicht mehr bezüglich der Energiequellen betrachtet wird, sondern ein einzelner durchschnittlicher Nutzungsgrad für Raumwärme  $\bar{n}_{rw}$  verwendet wird. Diese Berechnungsmethode wird auch im BSM-Modell verwendet.

$$EEB_{rw_{a,s}}(t) = GB_{a,s}(t) \cdot \frac{NEVK_{rw,a,s}}{\bar{n}_{rw}} \quad (3.9)$$

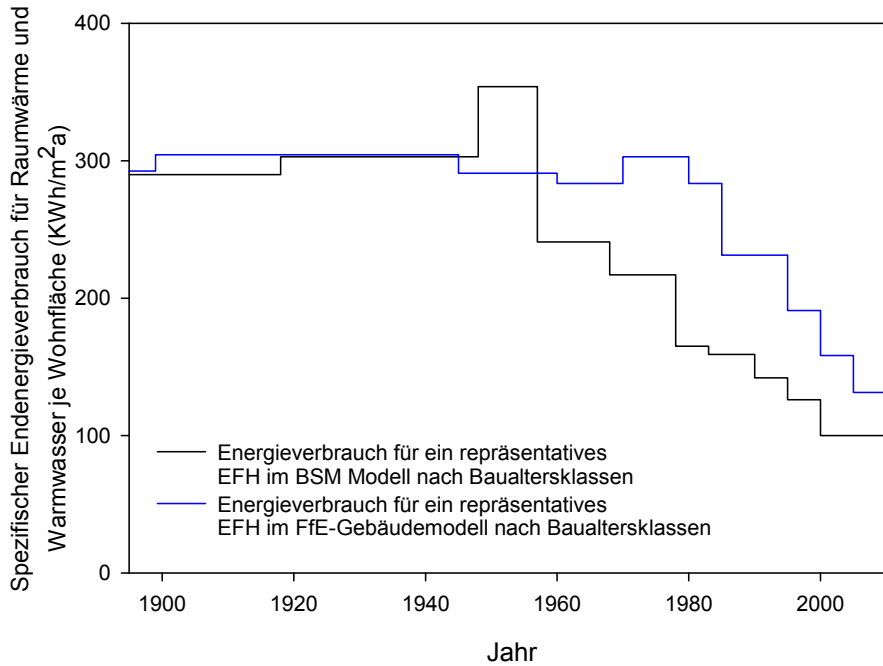
Hierbei ist anzumerken, dass im Rahmen der Entwicklung des FfE-Gebäudemodells und BSM-Modells von den Autoren der Modelle Grunddaten der Nutz- bzw. Endenergieverbrauchskennwerte je Haus-Archetyp im deutschen Wohnungssektor ermittelt wurden

(Anhang C, Abschnitt C.8). So wurden durch Corradini et al. [16] Daten für das FfE-Gebäudemodell, auf Basis von vier verschiedenen Studien [44, 45, 216, 217] zum spezifischen Nutzenergieverbrauch für jeden Haus-Archetyp betrachtet, während McKenna et al. [27] für das BSM Modell allein Daten des spezifischen Endenergieverbrauchs je Haus-Archetyp aus der Studie „Energieeinsparung bei Alt- und Neubauten“ [218] verwendeten. Damit unterscheiden sich die Eingangsparameter signifikant (s. Beispiel in Abb. 3.6), obwohl sie den gleichen Gebäudebestand (Deutschland) beschreiben.

Abb. 3.6 zeigt den Vergleich des spezifischen Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser für ein repräsentatives Einfamilienhaus (EFH) für das BSM-Modell und das FfE-Gebäudemodell. Im Zeitraum vor 1950 sind die spezifischen Endenergieverbräuche für Raumwärme und Warmwasser für ein repräsentatives Einfamilienhaus etwa gleich. Nach diesem Zeitraum gibt es einen deutlichen Unterschied der beiden Größen. Der Grund dafür liegt in dem verwendeten Wert des Nutzungsgrades zur Berechnung des Endenergieverbrauchs. Das FfE-Gebäudemodell verwendet ermittelte Daten des Nutzungsgrades aus zwei Studien der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE) [25, 35]. Diese Studien berücksichtigen keine Entwicklung des Nutzungsgrades (der durchschnittliche Nutzungsgrad aller gemessenen Anlagen betrug 67% im gesamten betrachteten Zeitraum), weshalb auch keine Verringerung des Endenergieverbrauchs infolge der Verbesserung des Nutzungsgrades zu verzeichnen ist (s. Anhang D).

Das Modell REM verwendet zur Berechnung des Endenergiebedarfs für Raumwärme sogenannte „Einheiten“. Eine Einheit besteht aus einer Reihe von Gebäuden mit ähnlichen Eigenschaften in Bezug auf ihren Wärmeverbrauch (Raumwärme und Warmwasser). Die Größe einer Einheit setzt sich aus der Summe der Grundfläche aller Gebäude (in  $m^2$ ) zusammen. Die benötigten Daten zur Bestimmung des Endenergiebedarfs mit REM werden aus der Studie des IWU „Deutsche Gebäudetypologie“ [41] (Anhang C, Abschnitt C.8) entnommen. Obwohl die letzten drei Modelle (FfE-Gebäudemodell, REM und BSM) einen ähnlichen Ansatz und Berechnungsmethode besitzen, unterscheiden sie sich im Wesentlichen aufgrund der benötigten Eingangsparameter. Daher ist ein Vergleich der Ergebnisse der Modelle sinnvoll, da so die Auswirkung der Eingangsparameter auf die Modelle beurteilt werden kann.

Das Modell MAED-2 verwendet hingegen zur Bestimmung des Energiebedarfs für Raumwärme Daten für Transmissionswärmeverluste und Informationen zur Gradtagzahl, wie in Gleichung 3.10 dargestellt ist.



**Abb. 3.6:** Vergleich des spezifischen Endenergieverbrauchs im Bereich Raumwärme und Warmwasser für die Modelle BSM und FfE-Gebäudemodell für ein repräsentatives Einfamilienhaus (EFH). Daten für BSM abgeleitet aus Datenquelle: [27] und Daten für das FfE-Gebäudemodell abgeleitet aus Datenquellen: [25, 35]

$$EEB_{rw,a,s}(t) = GB_{a,s}(t) \cdot WF_{a,s} \cdot h_{a,s} \cdot GTZ \quad (3.10)$$

mit:

$h_{a,s}$  – nutzflächenspezifischer Wärmeverlust je Haus-Archetyp und Baujahr in  $\frac{W}{m^2 K}$   
 $GTZ$  – Gradtagzahl in  $Kd$  (Heizgrenze  $15^\circ C$ , Innentemperatur  $20^\circ C$ )

Die nötigen Daten für MAED-2 zum Transmissionswärmeverlust wurden aus der Studie „Dena-Gebäudereport Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand“ der Deutschen Energie-Agentur (DENA) [210] und der Studie des IWU „Deutsche Gebäudetypologie“ [41] entnommen. Die Daten zu den Gradtagzahlen entstammen der „Online Database“ des Institutes für Wohnen und Umwelt (IWU) [153] und Angaben des Umweltbundesamts (UBA) [152] (Anhang C, Abschnitt C.9).



In Modellen mit hohem Detaillierungsgrad, also hauptsächlich in den bauphysikalischen Modellen, wird der übergeordnete Eingangsparameter „Spezifischer Endenergiebedarf für Raumwärme“ durch weitere detaillierte Eingangsparameter (u.a. Wärmekapazität, Innentemperatur, Außentemperatur, U-Werte und Flächen von Bauteilen, Volumen, Luftwechselrate) aufgeschlüsselt. Die bauphysikalischen Modelle verwenden zur Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme dasselbe Prinzip wie in Gleichung 3.9 dargestellt. Der einzige Unterschied liegt in den spezifischen Energieverbrauchskennwerten je Haus-Archetyp. Während die statistischen Modelle statistischen Daten des Endenergieverbrauchs nutzen, verwenden bauphysikalischen Modelle „Kernrechner“, welche die Endenergiebedarfskennwerte für Einzel-Haus-Archetypen berechnen.

EABS, das heißt der Kernrechner von ECCABS berechnet den jährlichen spezifischen Endenergiebedarf für Raumwärme je Haus-Archetyp durch die Integration der stündlichen Temperaturdifferenz zwischen der gewünschten Raumlufttemperatur  $\Theta_{r_{min}}$  und der zeitabhängigen Raumlufttemperatur  $\Theta_{int}(t + \Delta t)$  (Gleichung 3.11). In Gleichung 3.11 wird die Reaktionsfähigkeit eines Heizsystems  $Ph$ , sowie die effektive Wärmekapazität des gesamten Gebäudes  $C$  betrachtet.

$$EEB_{rw,a,s}(t) = \frac{Ph \cdot C}{3,6 \cdot 10^6} \cdot \int_0^z (\Theta_{r_{min}} - \Theta_{int}(t + \Delta t)) dt \quad (3.11)$$

$$0 < (t + \Delta t) \leq z$$

BREHOMES und CDEM verwendet als Kernrechner BREDEM. BREDEM bildet ebenfalls die Grundlage für SAP (Standard Assessment Procedure), welches der Kernrechner von DECM und CHM ist. In BREDEM wird der Endenergiebedarf für Raumwärme mit Hilfe der Gleichung 3.12 berechnet.

$$EEB_{rw,s} = \frac{Q_{h,s}}{\bar{n}_{rw}} \quad (3.12)$$

$$Q_{h,s} = Q_{h1,s} + Q_{h2,s} \quad (3.13)$$

Da in BREDEM zwei verschiedene Wohnraumzonen (mit verschiedenem Innentemperaturbedarf) berücksichtigt werden, wird die Berechnung des Endenergiebedarfs für Raum-

wärme in zwei Teilen durchgeführt. Der erste Teil ist die Bestimmung des Endenergiebedarfs  $Q_{h1}$  in einer beheizten Zone, der zweite Teil die Bestimmung des Endenergiebedarfs  $Q_{h2}$  in einer unbeheizten Zone. Die Summe beider Energiebedarfe wird als Gesamtendenergiebedarf für Raumwärme betrachtet (Gleichung 3.13).  $Q_{h1}$  und  $Q_{h2}$  wird mit Hilfe folgender Gleichungen berechnet.

$$Q_{h1,s} = 8,64 \cdot 10^{-5} \cdot (H_1 + H_2 \cdot H_D) DD \{T_{b1}\} \quad (3.14)$$

$$Q_{h2,s} = 8,64 \cdot 10^{-5} \cdot \left( \frac{H_2^2}{H_2 + H_3} \right) DD \{T_{b2}\} \quad (3.15)$$

mit:

- $H_1$  – Wärmetransferkoeffizient für Transmission in beheizten Zonen eines Gebäudes
- $H_2$  – Wärmetransferkoeffizient für Transmission in unbeheizten Zonen eines Gebäudes
- $DD \{T_{b1;b2}\}$  – Monatliche Gradtagzahl bezogen auf die Innentemperatur in der beheizten oder unbeheizten Zone

Der Wärmetransferkoeffizient  $H_3$  zwischen beheizten und unbeheizten Zonen wird entsprechend Tab. 3.3 ermittelt.

**Tab. 3.3:** Wärmetransferkoeffizient  $H_3$  zwischen beheizten und unbeheizten Zonen [38]

	$A_{z1} < A_{z2}$	$A_{z1} > A_{z2}$
1-geschossiges Wohnhaus	$0,8A_{z1} + 4,25\sqrt{A_{z1}}$	$0,8A_{z2} + 4,25\sqrt{A_{z2}}$
Zone 1 und Zone 2 sind nicht direkt mit einer Treppe verbunden	$2,53A_{z1} + 8,5\sqrt{A_{z1}}$	$2,53A_{z2} + 8,5\sqrt{A_{z2}}$
Zone 1 ist ein Teil einer Etage und eine Treppe verbindet diese Zone mit Zone 2	$4,2A_{z1} + 8,5\sqrt{A_{z1}}$	$4,2A_{z2} + 8,5\sqrt{A_{z2}}$
Zone 1 besteht aus dem gesamten Teil einer Etage und eine Treppe verbindet Zone 1 mit Zone 2	$4,2 A_{z1}$	$4,2 A_{z2}$

$A_{z1}$  und  $A_{z2}$  sind die Wohnflächen der beheizten bzw. unbeheizten Zonen in  $m^2$ .

$H_D$  in Gleichung 3.14 ist hierbei das Verhältnis zwischen den Wärmetransferkoeffizienten  $H_3$  und  $H_2 + H_3$  (Gleichung 3.16).

$$H_D = \left( \frac{H_3}{H_2 + H_3} \right) \quad (3.16)$$

In der Studie „Deutsche Gebäudetypologie“ wird jedoch gezeigt, dass Wohnungen in Deutschland im Regelfall keine getrennten beheizten oder unbeheizten Zonen haben [41]. Daher wurde in dieser Arbeit angenommen, dass jede Wohnung als eine einzelne beheizte Zone betrachtet wird.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die bauphysikalischen Modelle spezifische Daten zu den Haus-Archetypen, dem Klima und der Anlagentechnik benötigen. Die spezifischen Daten zu den Haus-Archetypen wie z.B. U-Werte und Flächen von Bauteilen, Volumen oder Luftwechselrate wurden im Wesentlichen aus der Studie „Deutsche Gebäudetypologie“ vom IWU [17, 41, 215, 219] entnommen und mit Hilfe von Daten aus anderen Studien [37, 220-222], die den deutsche Gebäudebestand beschreiben, ergänzt (Anhang C, Abschnitt C.10). Die Daten zum Klima (Sonnenstrahlung und Lufttemperatur) stammen vom Deutschen Wetterdienst (DWD) [223] und aus der DIN V 18599-10 (Klimadaten) [224] (Anhang C, Abschnitt C.11).

### 3.3.2.2 Bestimmung des Endenergiebedarfs für Warmwasser $EEB_{ww}$

Zur Bestimmung des Endenergiebedarfs für Warmwasser kann festgestellt werden, dass für alle Modelle ohne hohen Detaillierungsgrad, das heißt alle statistischen Modelle, Nutzenergieverbrauchskennwerte für Warmwasser  $NEVK_{ww,a,s}$  je nach Haus-Archetypen und Baujahr verwendet werden und damit denselben Berechnungsansatz aufweisen (Gleichung 3.17).

$$EEB_{ww}(t) = GB_{a,s}(t) \cdot \frac{NEVK_{ww,a,s}}{\bar{n}_{ww}} \quad (3.17)$$

Modelle mit hohem Detaillierungsgrad, das heißt alle bauphysikalischen Modelle, besitzen keine Ähnlichkeiten in der Berechnungsmethoden. Zum Beispiel werden in der Berechnung von BREDEM der Warmwasserbedarf, die Wärmeverluste in der Wasserverteilung

sowie im Warmwasserspeicher und der Nutzungsgrad der Heizanlage als Eingangsparameter für den jährlichen Endenergiebedarf für Warmwasser betrachtet (Gleichung 3.18). Im Gegensatz dazu berechnet EABS den Endenergiebedarf für Warmwasser mit Hilfe des durchschnittlichen spezifischen Energiebedarfs für Warmwasser pro Wohnfläche (Gleichung 3.19).

$$EEB_{ww} = \{Q_u + Q_{pp} + Q_t + Q_d - Q_s\} / (31,71 \cdot n_{ww}) \quad (3.18)$$

mit:

- $Q_u$  – Warmwasserbedarf bezogen auf die Anzahl der Nutzer
- $Q_{pp}$  – Wärmeverlust zwischen Kessel und Warmwasserspeicher
- $Q_t$  – Wärmeverlust im Warmwasserspeicher
- $Q_d$  – Wärmeverlust zwischen Warmwasserspeicher und Wasserhahn
- $Q_s$  – Warmwasserversorgung durch Solarenergie
- $n_{ww}$  – Nutzungsgrad der Heizanlage (multipliziert mit dem Faktor 31,71, um Einheit Watt zu GJ/Jahr zu wechseln) [38]

$$EEB_{ww}(t) = \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \cdot \int_0^{8760} (EEVK_{ww,wf} \cdot WF \cdot 3600) dt \quad (3.19)$$

mit:

- $EEVK_{ww,wf}$  – durchschnittlicher spezifischer Endenergieverbrauch für Warmwasser pro Wohnfläche [ $W/m^2$ ]
- $WF$  – Wohnfläche [ $m^2$ ]

### 3.3.2.3 Bestimmung des Endenergiebedarfs für Kochen $EEB_{ko}$ , Elektrogeräte und Beleuchtung $EEB_{eb}$

In den drei Nutzungsbereichen Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung ist zu sehen, dass sowohl für Modelle mit hohem als auch für solche mit niedrigem Detaillierungsgrad die

übergeordneten Eingangsparameter „Spezifischer Endenergiebedarf für Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung“ keinen hohen Aufschlüsselungsgrad aufweisen. Weiterhin gibt es Ähnlichkeiten im Modellansatz. So werden bauphysikalische Modelle wie REEPS und ECCABS dieselbe Berechnungsmethode wie die statistischen Modelle, d.h. sie verwenden Nutzenergieverbrauchskennwerte für repräsentative Haus-Archetypen für jeden Nutzungsbereich (Gleichung 3.20 und Gleichung 3.21).

$$EEB_{ko,a,s}(t) = GB_{a,s}(t) \cdot \frac{NEVK_{ko,a,s}}{\bar{n}_{ko}} \quad (3.20)$$

$$EEB_{eb,a,s}(t) = GB_{a,s}(t) \cdot \frac{NEVK_{eb,a,s}}{\bar{n}_{eb}} \quad (3.21)$$

Im Gegensatz dazu, hängt in BREDEM (Kernrechner von BREHOMES) der Endenergiebedarf für Kochen im Wesentlichen von den verwendeten Kochgeräten und der Anzahl der Nutzer ab. Außerdem wird in BREDEM der größte Teil der beim Kochen an die Umgebung abgegebenen Wärme als interner Wärmegewinn berücksichtigt. Die Gleichungen zur Bestimmung des Endenergiebedarfs für Kochen nach BREDEM sind in Tab. 3.4 dargestellt.

**Tab. 3.4:** Gleichungen zur Berechnung des Endenergiebedarfs für Kochen. Quelle: basierend auf Anderson et al. 2010 [38]

Kochsystem	Gleichungen Endenergiebedarf <b>EEE<sub>kk</sub></b> (GJ/Jahr)
Elektroherd	$1,70 + 0,34 \cdot N$
Gasherd	$2,98 + 0,60 \cdot N$
Küchenherd Brennstoffe: Holz, Holzbriketts, Braunkohlebriketts	$3,91 + 0,85 \cdot N$
Gasherd mit Elektrobackofen	$1,49 + 0,30 \cdot N$ (Gas) $0,85$ $+ 0,17 \cdot N$ (Elektrizität)

Für Beleuchtung und Elektrogeräte wird der Elektrizitätsenergiebedarf  $E_{LA}$  in BREDEM auf Grundlage der Anzahl der Nutzer ( $N$ ) und der Wohnfläche ( $WF$ ) bestimmt (s. Gleichung 3.22 bis Gleichung 3.24).

$$E_{LA} = 4,47 + 0,0232 \cdot WF \cdot N \quad (3.22)$$

für  $WF \cdot N < 710$

$$E_{LA} = 11,98 + 0,0146 \cdot WF \cdot N - 2,78 \cdot 10^{-6} \cdot (WF \cdot N)^2 \quad (3.23)$$

für  $710 \leq WF \cdot N < 2400$

$$E_{LA} = 31,01 \quad \text{für } 2400 \leq WF \cdot N \quad (3.24)$$

### 3.3.3 Energiepreise und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren

Die anderen zwei Gruppen von Eingangsparametern, die die bestehenden Modelle benötigen, sind der Energiepreis und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren. Daten bezüglich der Energiepreise wurden in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet, da der Fokus in der Prognose des Endenergiebedarfs und der Freisetzung von CO<sub>2</sub>-Emissionen liegt. Daten für Emissionsfaktoren wurden einer Studie des Öko-Instituts und dem FhG-ISI [151] sowie einer Arbeit des IWU [225] entnommen und die Daten der gesamten Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Wohnungssektor der „Online Database“ des UBA [152] (Anhang C, Abschnitt C.12). Hierbei verwenden die bauphysikalischen und statistischen Modelle zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen dasselbe Berechnungsverfahren. Die Summe aller  $PEB$  (Primärenergiebedarf) multipliziert mit den dazugehörigen  $EF$  (Emissionsfaktoren) ergeben die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dabei werden beide Faktoren nach Energiequellen unterteilt und entsprechend mit  $q$  indiziert (Gleichung 3.25).

$$CO_2 = \sum PEB_q \cdot EF_q \quad (3.25)$$

## 4 Überprüfung bestehender Prognosemodelle auf ihre Übertragbarkeit, Genauigkeit, Sensitivität und Unsicherheit

### 4.1 Methodik zur Überprüfung der bestehenden Modelle

In diesem Kapitel werden die Methoden und Parameter erläutert, die zur Bestimmung der Übertragbarkeit, der Genauigkeit, der Sensitivität und der Unsicherheit der zwölf Modelle aus Tab. 3.1 verwendet werden.

#### 4.1.1 Übertragbarkeit

Übertragbarkeit wird hier definiert als die grundsätzliche Eignung eines Modells, den Endenergiebedarf eines beliebigen Landes zu bestimmen, auch wenn es ursprünglich nicht für dieses Land entwickelt worden ist. Wie die Tab. 3.1 und Tab. 3.2 verdeutlichen, wurde die Mehrheit der dort aufgeführten Modelle für ein spezifisches Land unter Berücksichtigung einer bestimmten Aufgabenstellung entwickelt. Die Übertragbarkeit solcher Modelle ist jedoch laut Bhattacharyya und Timilsina [212] mit Schwierigkeiten verbunden, die die Weiterentwicklung in ein umfassendes Modellierungswerkzeug erschweren. Eine detaillierte Analyse dieser Schwierigkeiten und eine Bewertung der Übertragbarkeit von Prognosemodellen zur Bestimmung des Endenergiebedarfs wurden jedoch bisher noch nicht durchgeführt, auch nicht im Rahmen der Arbeit von Bhattacharyya und Timilsina [212].

Mit der Übertragbarkeit von bestehenden Modellen würde die Notwendigkeit entfallen, ein neues Modell für jedes neu untersuchte Land zu entwickeln. Außerdem würde ein solches Modell Ländern ohne speziell entwickelte Modelle bei der Entwicklung und Bewertung von Energieeinsparmaßnahmen unterstützen, da auf bereits bewährte und validierte Modelle zurückgegriffen werden könnte.

Zur Verifizierung der Übertragbarkeit der zwölf bestehenden Modelle aus Tab. 3.1 werden in dieser Arbeit zwei Kriterien verwendet: erstens, das grundsätzliche Vorhandensein der benötigten Daten zur Modellierung, und zweitens, die Flexibilität des Algorithmus der Modelle für Anpassungen bzw. Änderungen, um den Endenergiebedarf eines anderen Landes zu bestimmen.

#### 4.1.2 Genauigkeit

Genauigkeit der Prognosemodelle wird hier definiert als die Nähe der mit den Modellen erlangten Ergebnisse zu den „tatsächlichen“ Werten für die Ausgabeparameter des Modells. In diesem Fall beziehen sich diese „tatsächlichen“ Werte auf die Vergleichswerte der nationalen statistischen Endenergieverbrauchsdaten für den deutschen Wohnungssektor des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie [64]. Diese statistischen Endenergieverbrauchsdaten für den deutschen Wohnungssektor werden von der AGEB (AG Energiebilanzen e.V.) ermittelt und jährlich vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie herausgegeben. Sie basieren auf empirischen Daten von DESTATIS (Statistisches Bundesamt) und Energieversorgungsunternehmen [226]. Diese Daten werden durch repräsentative Studien zum Energieverbrauch in Privathaushalten, wie durch die Studien „Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2011 bis 2013“ [227] oder den „Mikrozensus 2010“ [228], ergänzt. Wenn die repräsentativen Untersuchungen nicht ausreichen, um die relevanten Energiedaten wie die Unterteilung des Endenergieverbrauchs in Nutzungsbereiche (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung) ermitteln zu können, werden zusätzlich die von der AGEB entwickelten Bottom-up-Modelle „EEFA-Wohnungsmodell“ und „ZSW-Solarthermiemodell“ zur Ermittlung der fehlenden Daten verwendet [229] .

Zur Beurteilung der Genauigkeit der hier untersuchten Modelle werden zwei Zeiträume betrachtet: ein „Referenzzeitraum“ von 1990 bis 2000 sowie ein „Prognosezeitraum“ von 2000 bis 2010. Alle Modellierungen können Daten aus dem „Referenzzeitraum“ verwenden, um den Endenergieverbrauch zwischen 1990 und 2000 zu bestimmen. Außerdem werden statistische Daten aus dem „Referenzzeitraum“ verwendet, um die Modelle mit grundlegenden Informationen für die Erstellung einer Prognose im „Prognosezeitraum“ zu versorgen. Im „Prognosezeitraum“ werden allein die Berechnungsmethoden des jeweiligen Modells verwendet, um den Endenergiebedarf zu prognostizieren. Die Ergebnisse werden wiederum mit den vorhandenen nationalen statistischen Daten zum gesamten Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor [64] verglichen.

Die folgenden Analyseparameter werden für den Vergleich von simulierten und statistischen Daten genutzt:

- a) Der relative Abweichungsfehler zur Berechnung des Verhältnisses zwischen den jährlichen absoluten Ergebnissen der Simulation und den Daten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie [64]



- b) Der Mittelwert der prozentualen Differenz (MPD), der berechnet wird, um die Ähnlichkeit der Ergebnisse der Simulation mit den Daten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie [64] im gesamten betrachteten Zeitraum (Referenz- oder Prognosezeitraum) zu ermitteln. Die prozentuale Differenz wird gebildet, indem die absolute Differenz der beiden Variablen durch deren Durchschnitt geteilt wird (Gleichung 4.1). Dies ermöglicht die Überprüfung der Eignung der Modelle zur Bestimmung des Endenergieverbrauchs und der Prognose des Endenergiebedarfs über einen Zeitraum von jeweils zehn Jahren.

$$MPD = \left( \frac{1}{m-j} \sum_j^m \frac{|E_{it} - E_{is}|}{\left( \frac{E_{it} + E_{is}}{2} \right)} \right) \cdot 100\% \quad (4.1)$$

$$j, m = \begin{cases} 1990, 2000 \\ 2001, 2010 \end{cases}$$

mit:

$E_{it}$  – tatsächlicher Endenergieverbrauch eines Jahres  $i$

$E_{is}$  – simulierter Endenergieverbrauch eines Jahres  $i$

- c) Der Korrelationskoeffizient  $r$  zur Bestimmung des Grades des linearen Zusammenhangs zwischen den Ergebnissen der Modellierung für den Endenergiebedarf und den tatsächlichen statischen Ergebnissen (Gleichung 4.2).

$$r_{x,y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \quad (4.2)$$

mit:

$\sigma_{XY}$  – Kovarianz ( $X, Y$ )

$\sigma_X$  – Standardabweichung der Variable  $X$

$\sigma_Y$  – Standardabweichung der Variablen  $Y$

Der Korrelationskoeffizient  $r$  kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen. Da es keine allgemeingültige Klassifikation der Werte für den Korrelationskoeffizienten gibt, werden im Folgenden, wie in der Tab. 4.1 dargestellt, die von Zühlke [230] vorgeschlagene Unterteilung und Interpretation verwendet.

- d) Das Bestimmtheitsmaß  $r^2$ , welches das Quadrat des Korrelationskoeffizienten darstellt und als der prozentuale Anteil der Streuung einer Variablen interpretiert wird,

die durch eine andere Variable erklärt werden kann. Das Bestimmtheitsmaß ist folglich das Verhältnis von erklärter Varianz zur Gesamtvarianz. Wenn also beispielsweise  $r = 0,9$  ist, dann ergibt sich  $r^2 = 0,81$ , d.h. 81% der Streuung der Y-Werte werden durch die Streuung der X-Werte in einem linearen Zusammenhang erklärt.

**Tab. 4.1:** Ansatz zur Unterteilung und Interpretation des Korrelationskoeffizienten, nach Zühlke, 2007 [230]

Korrelation	Korrelationskoeffizient $r$	Interpretation
<b>perfekt</b>	$r = 1$	perfekte Ähnlichkeit, identische Verläufe
<b>sehr stark</b>	$0,75 \leq r < 1$	große Ähnlichkeit, deutliche Gemeinsamkeiten
<b>mittel</b>	$0,50 \leq r < 0,75$	mäßige Ähnlichkeit
<b>schwach</b>	$0,00 \leq r < 0,50$	geringe Ähnlichkeit
<b>sehr gering</b>	$-1 \leq r < 0,00$	sehr große Unterschiede, gegenläufige Kurven

#### 4.1.3 Sensitivitätsanalyse

Laut Saltelli et al. [231] ist eine Sensitivitätsanalyse zur Entwicklung eines jeden Modells substanziell notwendig. Im Wesentlichen wird mithilfe einer Sensitivitätsanalyse die Robustheit eines Modells getestet und die Modellsensitivität bei Veränderungen in den Eingangsparametern bestimmt [232]. Diese Analyse ermöglicht die Bewertung, welcher Eingangsparameter den größten Einfluss auf den zugehörigen Modellausgangsparameter ausübt [233]. Hier wird eine Sensitivitätsanalyse mit einem one-at-a-time (OAT) Ansatz verwendet, worunter zu verstehen ist, dass die Eingangsparameter ( $k_j$ ) des Modells individuell um  $\Delta k_j$  verändert werden, während die anderen Eingangsparameter konstant bleiben. Für jede Änderung der Eingangsparameter wird eine neue Simulation durchgeführt und die neuen ermittelten Ausgangsparameter werden verwendet, um den Sensitivitätskoeffizienten  $\delta y_i / \delta k_j$  zu berechnen [26]. Hierbei ist  $y_i$  der i-te Ausgangsparameter und  $k_j$  der j-te Eingangsparameter. Die Berechnung der Sensitivitätskoeffizienten ( $S_i$ ) wird mithilfe der folgenden Gleichung durchgeführt:

$$S_i = \frac{\delta y_i}{\delta k_j} \approx \frac{y_i(k_j + \delta k_j) - y_i(k_j - \delta k_j)}{2\Delta k_j} \quad (4.3)$$

$$i = 1, \dots, n \text{ und } j = 1, \dots, m$$

Um die Sensitivitätskoeffizienten für Eingangsparameter mit unterschiedlichen Einheiten und Größen miteinander vergleichen zu können, wird ein normalisierter Sensitivitätskoeffizient berechnet. Der nach der Gleichung 4.4 ermittelte normalisierte Sensitivitätskoeffizient  $S_{i,j}$  repräsentiert die Variationen in den Ausgangsparametern mit einer definierten prozentualen Veränderung in den Eingangsparametern. In dieser Arbeit wird eine Veränderung von  $\pm 1\%$  in den Eingangsparametern des jeweiligen Modells ( $k_j$ ) verwendet.

$$S_{i,j} = \frac{k_j}{y_i} \frac{\delta y_i}{\delta k_j} \quad (4.4)$$

$$i = 1, \dots, n \text{ und } j = 1, \dots, m$$

#### 4.1.4 Unsicherheit

Die Ausgangsparameter von Modellen sind mit Unsicherheiten verbunden, insbesondere aufgrund der Annahmen in der Modellierung und der inhärenten Unsicherheit der Eingangsparameter [63]. Laut Eyre und Baruah [234] stellen für Prognosemodelle im Wohnungssektor einflussreiche Eingangsparameter wie Bevölkerungswachstum, durchschnittliche Wohnfläche der Haus-Archetypen oder der zukünftige spezifische Raumwärmebedarf wesentliche Unsicherheiten für die Modellierung dar, welche oft vernachlässigt werden. Hughes et al. [63] ermittelten beispielsweise für das CHM-Modell fünf Unsicherheitsgebiete:

- a) die verwendeten Daten des Gebäudebestandes für die Modellierung (ca. 16.500 repräsentative Haus-Archetypen),
- b) die internen Werte des Kernrechners SAP (bezüglich Mess- und Stichprobenfehler),
- c) das Nutzerverhalten (angesichts der begrenzten Daten wird im Modell ein allgemeines, gleiches Nutzerverhalten in allen Haus-Archetypen angenommen),
- d) die Klimadaten (aufgrund von Messfehlern und räumlichen Stichprobenfehlern von Daten der Außentemperatur und Windgeschwindigkeit) und
- e) die Probenahme der Daten von Haus-Archetypen (wegen der Stichprobenfehlern des English Housing Survey).

Zur Bestimmung der Unsicherheiten von Modellen wird oft die sogenannte Unsicherheitsanalyse (UA) verwendet [235]. Es gibt verschiedene Techniken, um die Unsicherheit von

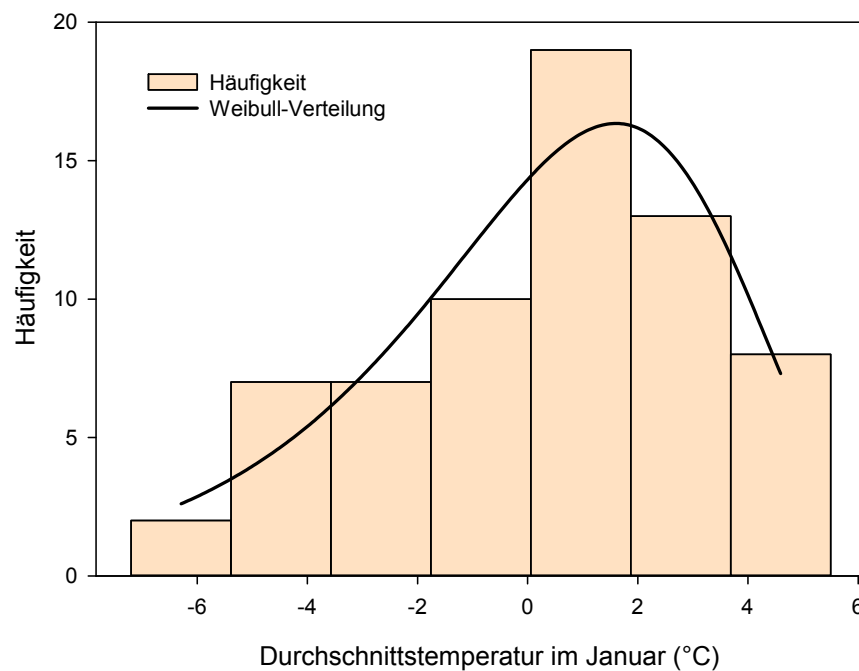
Modellen zu analysieren [236], allerdings werden die „Differential Sensitivity Analysis“ (DSA) und die „Monte Carlo Analysis“ (MCA) am häufigsten verwendet. Der Vorteil einer DSA ist, dass sie die Identifizierung der einflussreichsten Parameter eines Modells ermöglicht. Trotzdem ist das DSA-Verfahren nicht optimal für die Analyse von Simulationen mit einer großen Anzahl von Eingangsparametern, weil die Simulationen sehr aufwendig sind und die Identifizierung von Unsicherheiten aufgrund von Interaktionen zwischen den Eingangsparametern mit einer DSA nicht möglich ist [237]. Dagegen verwendet die MCA zur Gesamtbeurteilung der Unsicherheit der Modelle den sogenannten „Zentralen Grenzwertsatz“, welcher die Bewertung der Gesamtunsicherheit der Modelle aufgrund der einzelnen Unsicherheiten und der Interaktion zwischen den Eingangsparametern ermöglicht.

Da eines der Ziele dieser Arbeit die Bestimmung der Unsicherheit der einzelnen Eingangsparameter sowie der möglichen Interaktion zwischen den Eingangsparametern ist, wurde für jedes übertragbare Modell eine Monte Carlo Analyse (MCA) mithilfe der Software „Crystall Ball“ [238] durchgeführt. Zur Durchführung der MCA wurde zuerst eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für jeden Eingangsparameter der übertragbaren Modelle gebildet. Danach wurde eine Simulation mit zufällig ausgewählten Werten der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der einzelnen Eingangsparameter durchgeführt. Dieses Verfahren wurde dann mit neuen zufällig ausgewählten Werten wiederholt. Insgesamt wurden über 1.000 Simulationen für jedes der untersuchten Modelle durchgeführt. Auf diesem Weg wurde die Unsicherheit des Ausgangsparameters „Endenergiebedarf“ als eine neue Wahrscheinlichkeitsverteilung für jedes Jahr des Prognosezeitraumes erhalten.

Zur Entwicklung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Eingangsparameter wurden historische statische Daten eines jeden Eingangsparameters ausgewertet. Daraufhin wurde eine Häufigkeitsverteilung mithilfe von Histogrammen erstellt. Damit war es dann möglich, eine passende Wahrscheinlichkeitsverteilung wie eine Normalverteilung, Weibull-Verteilung, Beta-Verteilung oder Dreiecksverteilung abzuleiten und durch eine entsprechende Funktion zu beschreiben. Zur Bestimmung der Anzahl der Klassen in den Histogrammen der Eingangsparameter wurde hierbei die Sturges Gleichung [239] verwendet. Diese stellt ein passendes Berechnungsverfahren für eine reduzierte Skala ( $n < 200$ ) von echten Datensätzen dar [240].

Die Abb. 4.1 zeigt beispielhaft, dass die monatliche Durchschnittstemperatur im Januar einer Weibull-Verteilung folgt, was dann in die MCA eingeflossen ist. Allerdings war es nicht immer möglich, eine Wahrscheinlichkeitsfunktion zu bestimmen, entweder aufgrund

fehlender Daten oder weil die Histogramme keine Übereinstimmung mit einer der bekannten Wahrscheinlichkeitsfunktionen aufwiesen. Zum Beispiel konnte der Eingangsparameter „Gradtagzahl“ nicht mit einer bekannten Wahrscheinlichkeitsfunktion beschrieben werden (Abb. 4.2). In solchen Fällen können die Werte aus einem Bereich, der durch die maximalen und minimalen Werte des Eingangsparameters definiert wird, ausgewählt werden.

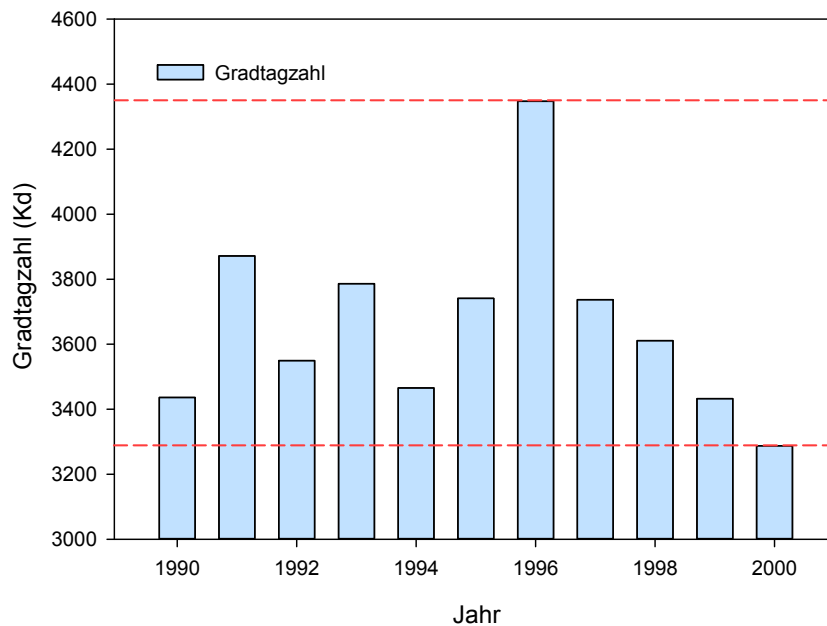


**Abb. 4.1:** Histogramm und Wahrscheinlichkeitsfunktion der Durchschnittstemperatur im Januar in Deutschland, basierend auf langfristigen Daten zwischen 1948 und 2013. Abgeleitet aus Datenquelle: [223]

Für den Eingangsparameter „Gradtagzahl“ beispielsweise gibt es elf Werte im „Referenzzeitraum“ (von 1990 bis 2000), die sich im Bereich zwischen 3.287 und 4.347 Kd befinden. Hierbei wird in den Simulationen angenommen, dass jeder Wert im vorbestimmten Bereich zufällig mit der gleichen Wahrscheinlichkeit in der Simulation verwendet werden kann (diskrete gleichmäßige Verteilung).

Im Rahmen der Datenerhebung für diese Arbeit wurden zwei Kategorien von Eingangsparametern identifiziert: erstens dynamische und zweitens statische Eingangsparameter.

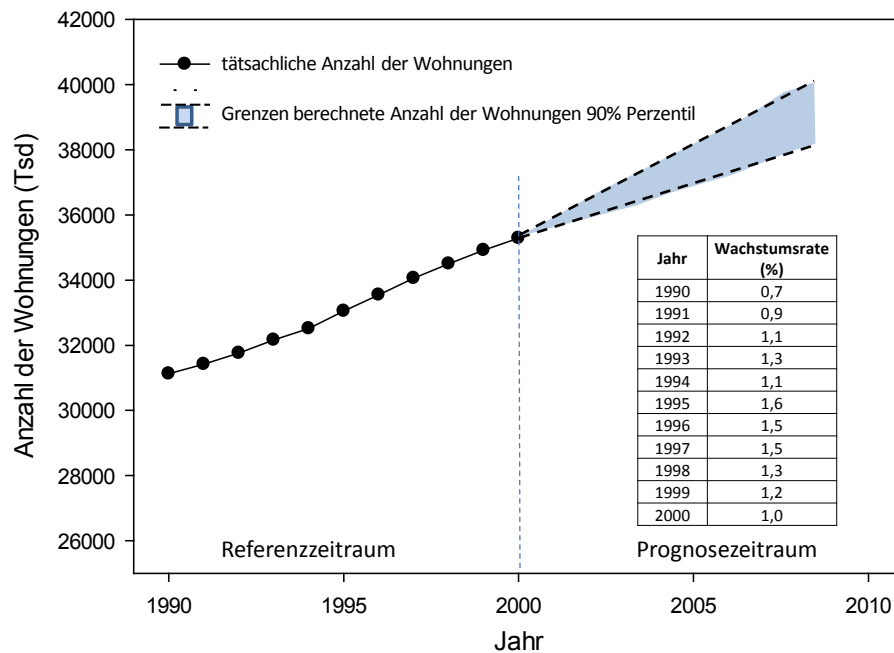
Die dynamischen Eingangsparameter haben nicht nur einen Einfluss auf den Endenergieverbrauch in einem bestimmten Jahr, sondern auch einen langfristigen Einfluss auf den zukünftigen Endenergiebedarf. Ein Beispiel für einen solchen Parameter ist die „Anzahl der



**Abb. 4.2:** Histogramm Gradtagzahl bezogen auf die Heizgrenze  $15^{\circ}\text{C}$  in Deutschland zwischen 1990 und 2000, abgeleitet aus Datenquelle: [241]

Wohnungen“. Dieser Parameter wurde im ersten Prognosejahr (2001) in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeitsfunktion der vergangenen Jahre (in diesem Fall den Wachstumsraten für die Anzahl der Wohnungen) im „Referenzzeitraum“ bestimmt. Dies bedeutet, dass es im Jahr 2001 elf wahrscheinliche Werte zur Bestimmung der Anzahl von Wohnungen gab. Für das zweite Prognosejahr (2002) existieren 121 wahrscheinliche Werte für die Anzahl der Wohnungen (basierend auf elf wahrscheinlichen Werten für die Anzahl der Wohnungen im Jahr 2001 multipliziert mit den elf wahrscheinlichen Wachstumsraten für 2002). Wird dieser Prozess für eine längere Zeitperiode wiederholt, steigt die Menge der wahrscheinlichen Werte für die Anzahl der Wohnungen signifikant. Abb. 4.3 zeigt, dass in diesem Fall die wahrscheinlichsten Werte für die zukünftige Anzahl der Wohnungen immer dichter werden, während die Verteilung erweitert wird. Andere Eingangsparameter, die zu dieser Kategorie dynamische Eingangsparameter gehören, sind:

- die Bevölkerungsentwicklung,
- die Personen pro Wohnung,
- der Nutzungsgrad der Heizungsanlage,
- der spezifische Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasserversorgung sowie
- die Ersatzrate von Gebäuden.



**Abb. 4.3:** Beispiel für die Entwicklung eines dynamischen Eingangsparameters, in diesem Fall die Anzahl der Wohnungen in Deutschland, abgeleitet aus Datenquelle: [241]

Sämtliche anderen Eingangsparameter, bei welchen die Wahrscheinlichkeitsverteilung jedes Jahr weitestgehend gleich ist und sich der Ausgangspunkt nicht ändert, wurden als statische Parameter klassifiziert. Beispiele für entsprechende Eingangsparameter sind:

- Innentemperatur,
- Außentemperatur,
- Sonneneinstrahlung,
- Luftwechselrate,
- Fläche der Bauteile (Türen, Fenster, Wände und Dächer).

Insgesamt wurden mehr als 127 Eingangsparameter untersucht. In der Tab. 4.2 werden elf ausgewählte einflussreiche Parameter, einschließlich ihrer jeweiligen Wahrscheinlichkeitsfunktion und der dazugehörigen Kategorie (dynamisch oder statisch) exemplarisch dargestellt. Eine Liste mit allen betrachteten Eingangsparametern wird im Anhang C, Abschnitt C.13 aufgeführt.

**Tab. 4.2:** Wahrscheinlichkeitsfunktion für ausgewählte einflussreiche Eingangsparameter

Input Parameter	Kategorie <sup>1</sup>	Wahrscheinlichkeitsfunktion
Innentemperatur (°C)	S	Diskrete gleichmäßige Verteilung (DGV) [18 - 21]
Außentemperatur Januar <sup>2</sup> (°C)	S	Weibull [1,2; 3,9; -0,02]
Außentemperatur August <sup>2</sup> (°C)	S	Normal [18,7; 1,9]
Wachstumsrate Anzahl der Wohnungen (%)	D	DGV [0,7 - 1,6]
Luftwechselrate (1/h)	S	DGV [0,5 - 0,9]
Spezifische Endenergieverbrauch eines Einfamilienhauses (kWh/(m <sup>2</sup> a))	D	DGV [178 → 119] <sup>3</sup>
Wohnfläche eines Einfamilienhauses	S	Normal [105; 8,2]
Gradtagzahl (Kd)	S	DGV [3433 - 4347]
Nutzungsgrad Heizungsanlage (betrieben mit Gas) (%)	D	DGV [0,7 → 1] <sup>3</sup>
Jahresdurchschnitt Sonnenstrahlung <sup>4</sup> (W/m <sup>2</sup> )	S	Normal [72; 46,2]

<sup>1</sup> D dynamische Eingangsparameter, S statische Eingangsparameter.

<sup>2</sup> Die Monate Januar und August sind hier als Beispiele aufgeführt, in den Berechnungen wurden alle Monate berücksichtigt

<sup>3</sup> Tendenz der Eingangsparameter.

<sup>4</sup> Auf eine horizontale Ebene bezogene kontinuierliche Einstrahlung.

## 4.2 Ergebnisse der Überprüfung der bestehenden Modelle

### 4.2.1 Übertragbarkeit

Auf der Basis der zwei Kriterien für die „Übertragbarkeit“, das heißt der Verfügbarkeit der zur Modellierung notwendigen Daten und die Anpassungs- bzw. Modifizierungsflexibilität der Algorithmen, wurde festgestellt, dass alle statistischen Modelle übertragbar sind, was jedoch nicht auf alle bauphysikalischen Modelle zutrifft. Die bauphysikalischen Modelle CREEM-, DECM- und CHM fallen unter die Kategorie der nicht übertragbaren Modelle. Der Hauptgrund für die Nichtübertragbarkeit dieser Modelle besteht darin, dass die Kernrechner, die diese Modelle verwenden (HOT2000, SAP-2005 und SAP-2009), nicht die Eingabe von Klimadaten aus anderen Ländern ermöglichen (HOT2000 verwendet nur Klimadaten aus Kanada und SAP nur aus UK). Dadurch ist es letztendlich unmöglich, eine Modellierung des Endenergiebedarfs in einem anderen Land durchzuführen. Der Kernrechner für REEPS (DOE-2) [49] macht das Modell ebenfalls zu einem nicht übertragbaren Modell, weil er Daten wie Länge, Breite und Orientierung des Gebäudes



benötigt, welche jedoch für die repräsentativen Gebäude (Haus-Archetypen) des deutschen Gebäudebestandes nicht vorhanden sind [242].

Darüber hinaus ist die Datensammlung erwartungsgemäß (siehe auch Abschnitt 3.2) für detailliertere Modelle, das heißt prinzipiell für die bauphysikalischen Modelle, schwieriger. Alle anderen Modelle (BREHOMES, MAED-2, CDEM, REM, FfE-Gebäudemodell, LEAP, BSM, ECCABS), bei denen es möglich war, die benötigten Daten zusammenzustellen, und die außerdem die Eignung zur Anpassung bzw. Modifizierung aufweisen, wurden hier als „übertragbar“ klassifiziert. Tab. 4.3 zeigt eine Zusammenfassung von Datenquellen der Eingangsparameter, die für die Prognose des zukünftigen Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor benötigt wurden. Weiterhin sind die Modelle, welche die dazugehörigen Eingangsparameter verwenden, der Tab. 4.3 zu entnehmen.

**Tab. 4.3:** Modelleingangsparameter und die zugehörigen Datenquellen für den deutschen Wohnungsbestand

Eingangsparameter	Quelle(n)	Modelle, die diese Eingangsparameter benötigen
Anzahl der Gebäude/Wohnungen mit aufgeschlüsselten Daten für den Neubau (Addition und Ersatz) und Abbruch	[12-14, 23, 37, 152, 216, 243]	BREHOMES, MAED-2, CDEM, REM, FfE-Gebäudemodell, LEAP, BSM, ECCABS
32 Haus-Archetypen unterteilt in: Einfamilienhaus, Zweifamilienhaus, Mehrfamilienhaus und großes Mehrfamilienhaus und acht Baualtersklassen (vor 1861, 1861 - 1919, 1919 - 1949, 1949 - 1958, 1958 - 1969, 1969 - 1979, 1979 - 1984, 1984 - 1990)	[37, 41, 215, 219]	BREHOMES, CDEM, REM, FfE-Gebäudemodell, BSM, , ECCABS, MAED-2
Baucharakteristik der Haus-Archetypen (U-Werte, Fläche der Bauteile, Luftwechselrate)	[17, 37, 41, 215, 219-222]	BREHOMES, CDEM, ECCABS,
Bevölkerungsentwicklung	[11, 244]	BREHOMES, MAED-2
Personen pro Wohnung	[152]	MAED-2
Klimadaten (Gradtagzahl, Außentemperatur, Sonnenstrahlung)	[223, 224]	BREHOMES, MAED-2, CDEM, ECCABS,
Anlagen- und Gerätedaten (Größe, Nutzungsgrad der Heizung und Warmwasseranlagen, Wärmedämmung von Heizkesseln)	[154, 156-171, 245, 246]	BREHOMES, CDEM, REM, FfE-Gebäudemodell, MAED-2, LEAP, ECCABS
Wärmedämmung von Bauteilen, Fenster mit Doppelverglasung, Anteil der Beleuchtung mit Energiesparlampen (Referenzszenario auf der Basis von S-Kurven)	[154, 156, 219, 247, 248]	BREHOMES, CDEM
Wohnfläche (m <sup>2</sup> ) und durchschnittlicher Energieverbrauch nach Nutzungsbereichen (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Beleuchtung und Elektrogeräte) der Wohnungstypen bzw. Haus-Archetypen	[23, 37, 39, 41, 151, 152, 210, 249, 250]	MAED-2, REM, FfE-Gebäudemodell, LEAP, BSM
Energiequelle (Öl, Erdgas, Kohle, Strom, erneuerbare Energien) und CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren	[88, 151, 152, 225]	BREHOMES, CDEM, MAED-2, LEAP, REM, ECCABS

**Tab. 4.4:** Zusammenfassung der Anpassungen und Veränderungen der Modelle, um die Übertragbarkeit auf den deutschen Wohnungssektor zu gewährleisten

Modell	Anpassungen/Änderungen	Grund für Anpassung
LEAP	a) Korrektur der Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme.	a) Der Trend hinsichtlich des Endenergiebedarfs für Raumwärme änderte sich deutlich ab 2001. Eine Verwendung des 1990-2000 Trends erzeugt daher deutliche Abweichungen in den Ergebnissen der Prognose des Endenergiebedarfs.
FfE-Gebäudemodell	a) Hinzufügen von Daten zur Gesamtwohnfläche und der Anzahl an Gebäuden nach Haus-Archetyp und Baualtersklasse (angepasst an die in Tabelle 4-3 dargestellten Altersklassen). b) Hinzufügen der Nutzungsgrade von Anlagen zur Bereitstellung von Heizung und Warmwasser für den betrachteten Zeitraum (1990 - 2010). c) Einbeziehung von statistischen Daten für den Endenergieverbrauch für Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung <sup>1</sup> . d) Anpassungen zu der Entwicklung der Anzahl der Wohnungen.	a) Eine detaillierte Quantifizierung der Gesamtmengewohnfläche unterteilt nach Haus-Archetyp und Altersklasse ist nicht verfügbar. b) Daten zur Entwicklung des Nutzungsgrades von Anlagen zur Bereitstellung von Heizung und Warmwasser werden im originalen FfE-Gebäudemodell nicht berücksichtigt. c) Der Endenergieverbrauch für Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung wird im FfE-Gebäudemodell nicht berücksichtigt. d) Im Untersuchungszeitraum waren keine jährlichen Daten verfügbar für die Anzahl der Wohnungen.
REM	a) Einbeziehung von statistischen Daten für den Endenergieverbrauch für Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung <sup>1</sup> . b) Anpassungen in der Entwicklung der Anzahl der Wohnungen und ihres spezifischen Endenergieverbrauchs nach Nutzungsbereichen.	a) Der Energieverbrauch für Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung wird in REM nicht berücksichtigt. b) Die Originaldaten zur Anzahl an Gebäuden und ihrem spezifischen Endenergieverbrauch gelten für die Provinz Nordkarelien (Finnland).
ECCABS	a) Anpassung der Gebäudecharakteristika und der Anzahl der Haus-Archetypen. b) Austausch der Klimadaten zur Anpassung an die deutschen klimatischen Bedingungen (Außentemperatur, Sonnenstrahlung). c) Anpassungen in der Entwicklung der Anzahl der Wohnungen.	a, b, c) Die Originaldaten zu den klimatischen Bedingungen, den Gebäudecharakteristika und der Anzahl der Haus-Archetypen gelten für den schwedischen Gebäudebestand.
BREHOMES/CDEM	a) Anpassung der Gebäudecharakteristika und der Anzahl der Haus-Archetypen. b) Austausch der Klimadaten zur Anpassung an die deutschen klimatischen Bedingungen (Außentemperatur, Sonnenstrahlung). c) Änderung des Verhältnisses der Anzahl der Personen pro Wohnfläche. d) Anpassungen der Luftwechselrate und der Innentemperatur. e) Anpassungen in der Entwicklung der Anzahl der Wohnungen.	a, b, c, d, e) Die Originaldaten zu den klimatischen Bedingungen, den Gebäudecharakteristika und der Anzahl der Haus-Archetypen, das Verhältnis der Anzahl der Personen pro Wohnfläche, die Luftwechselrate und die Innentemperatur gelten für den britischen/englischen Gebäudebestand.

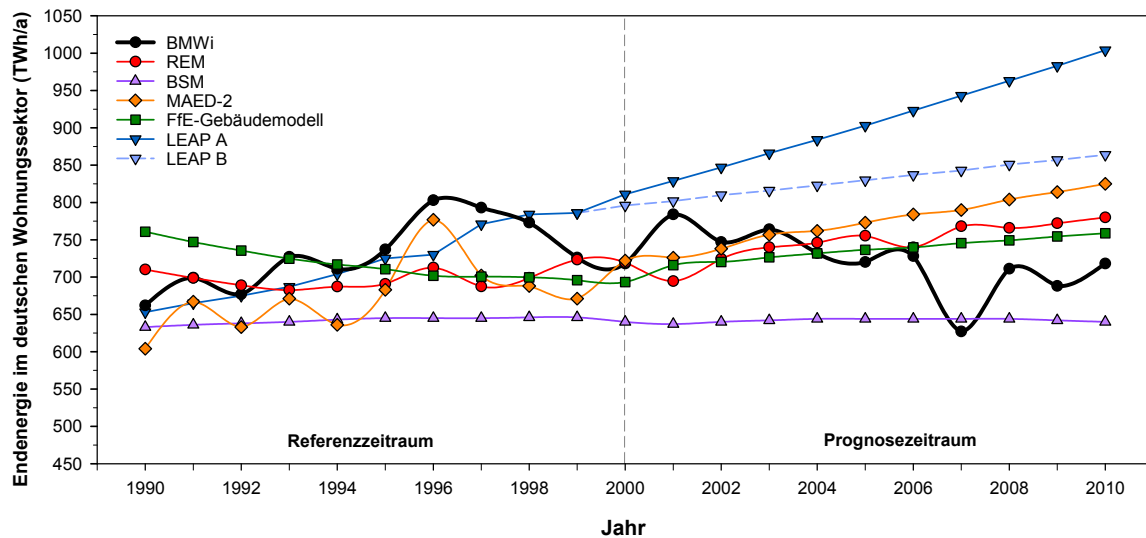
<sup>1</sup> Es ist anzumerken, dass diese statistischen Daten mit aufgenommen wurden, um den Vergleich mit den anderen Modellen bezüglich des gesamten Endenergiebedarfs zu erleichtern. Dies bedeutet jedoch auch, dass das FfE-Gebäudemodell und das REM-Modell für die Prognose des zukünftigen Endenergiebedarfs im Wohnungssektor eines Landes ohne weitere Anpassungen nicht verwendet werden können.

Die Ergebnisse für den Endenergieverbrauch im „Referenzzeitraum“ und den Endenergiebedarf im „Prognosezeitraum“ im deutschen Wohnungssektor wurden durch den Einsatz der in Tabelle 4-3 genannten Daten sowie eine „Überarbeitung“ der Modelle erhalten. Hierbei wurden für die „Überarbeitung“ Methoden und Ansätze verwendet, die, sofern möglich, den Vorschlägen der jeweiligen Autoren der originalen Modelle folgen. Falls notwendig, wurden weitere Anpassungen vorgenommen, um die Besonderheiten des deutschen Wohnungssektors abzubilden und einen Vergleich der Ergebnisse zu ermöglichen. Eine Zusammenfassung dieser Anpassungen und Veränderungen beinhaltet die Tab. 4.4. Hierbei ist anzumerken, dass die übertragbaren Modelle BSM und MAED-2 keine Anpassungen benötigten.

#### 4.2.2 Genauigkeit

Die Ergebnisse der Modellierung mit den einzelnen „übertragbaren“ Modellen werden in den Abb. 4.4 und Abb. 4.5 für die statistischen und die bauphysikalischen Modelle separat dargestellt, um die Korrelation zwischen dem Detaillierungsgrad und der Genauigkeit der Daten nach Modelltyp getrennt zu analysieren. Tab. 4.5 bietet eine Übersicht über die Genauigkeit der Modellergebnisse für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor in Relation zu den statistischen Daten des BMWi [64] entsprechend den in Abschnitt 4.1 definierten Analyseparametern.

Als eine generelle Tendenz ist zu beobachten, dass die statistischen Modelle gut dazu geeignet sind, den Endenergieverbrauch im „Referenzzeitraum“ zu bestimmen. Der Durchschnittswert für den Mittelwert der prozentualen Differenz im Vergleich zu den Daten des BMWi liegt zwischen 5% und 12% (Tab. 4.5). Dahingegen weichen die Ergebnisse der statistischen Modelle für den Endenergiebedarf im „Prognosezeitraum“ in einigen Fällen substantiell von den Daten des BMWi ab. Dies gilt insbesondere für das Modell LEAP-A, welches einen Mittelwert der prozentualen Differenz von 27% im Prognosezeitraum aufweist. Für die Simulation mit LEAP-A wurden die originalen Softwarefunktionen z.B. Logistic Forecast und Interpolierungsfunktionen mit der besten Übereinstimmung zur Entwicklung der Anzahl an Wohnungen und des Endenergieverbrauchs nach unterschiedlichen Nutzungsbereichen (Raumwärme, Warmwasser, Elektrogeräte, Kochen und Beleuchtung) im Referenzzeitraum verwendet. Es wurde festgestellt, dass die Fehler in der Prognose des Endenergiebedarfs mit LEAP-A auf die Trendänderungen einiger Eingangsparameter (Anzahl der Wohnungen und durchschnittlicher Endenergieverbrauch für Raumwärme) zurückzuführen sind, die mithilfe der originalen Softwarefunktionen nicht berücksichtigt werden konnten. Während die Zunahme an Wohnungen bis zum Jahr 2000 sehr linear mit



**Abb. 4.4:** Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten Endenergieverbrauch im Referenz- und Prognosezeitraum und dem modellierten Endenergiebedarf der statistischen Modelle REM, BSM, MAED-2, FfE-Gebäudemodell, LEAP-A (unter Nutzung der originalen Projektionen für den Endenergieverbrauch für Raumwärme und die Anzahl der Wohnungen) und LEAP-B (unter Berücksichtigung von Veränderungen im Trend des Endenergieverbrauchs für Raumwärme aufgrund der Energieeinsparverordnung [251] und der Anzahl der Wohnungen)

einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 1,3% verlaufen ist, ist die Wachstumsrate von 2001 bis 2010 auf 0,5% gesunken [23]. Außerdem hat sich der durchschnittliche jährliche Endenergieverbrauch für Raumwärme pro Wohnung (s. Anhang C, Abschnitt C.7) ab 2001 deutlich verringert von  $18 \text{ MWh}/\text{WE} \cdot a$  in 2001 bis auf  $16 \text{ MWh}/\text{WE} \cdot a$  in 2010. Die Schwierigkeit, verlässliche Prognosen mit einem Modell wie LEAP zu erhalten, in dem der simulierte Endenergiebedarf abhängig von einer Projektion der Tendenzen von historischen Eingangskennwerten ist, wurde auch in anderen Studien, in denen LEAP verwendet wurde, beobachtet [4-6, 8, 252]. In diesen Studien wird übereinstimmend mit der vorliegenden Arbeit festgestellt, dass die Prognose insbesondere dann ein großes Fehlerrisiko birgt, wenn der Trend des Endenergieverbrauchs sich stark ändert.

In der Simulation mit LEAP-B, deren Ergebnisse neben denen von LEAP-A in der Abb. 4.4 dargestellt sind, wurde in der Modellierung eine Verringerung des Endenergiebedarfs für neue Gebäude als Folge der Reduktion des spezifischen Endenergieverbrauchs durch Einhaltung der Wärmeschutzverordnung und später der Energieeinsparverordnung berücksichtigt. Dieses führt zu einer Verbesserung der Genauigkeit der Ergebnisse, was durch den verbesserten Mittelwert der prozentualen Differenz (16%) zu erkennen ist. Das

bedeutet jedoch, dass ein Nutzer dieses Modells (LEAP) eine sachkundige Entscheidung gemäß der zu erwartenden Änderungen in den Eingangsparametern treffen muss, um verlässliche Prognoseergebnisse zu erhalten.

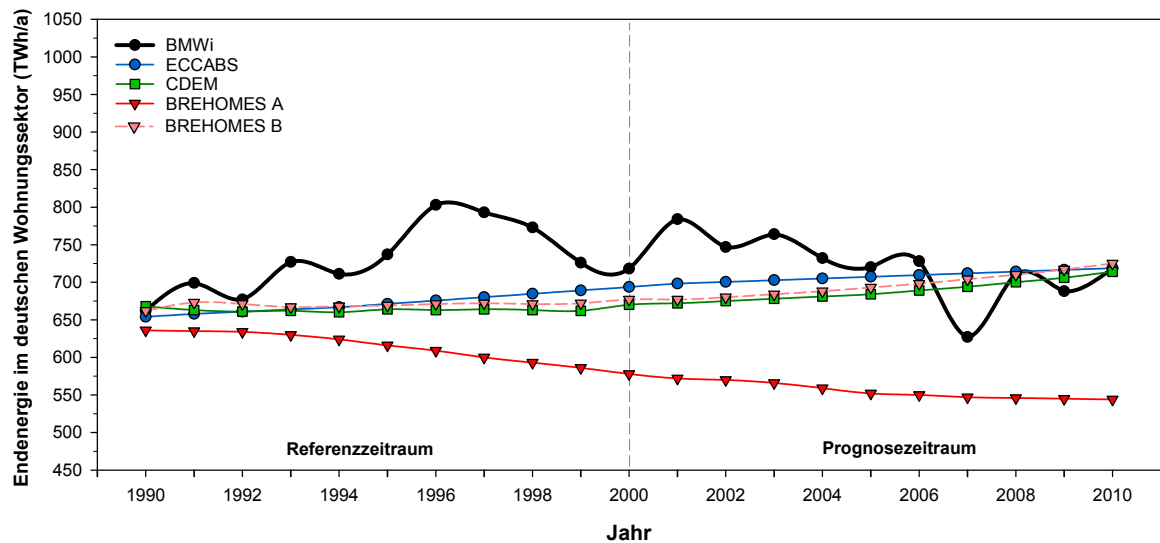
Innerhalb der untersuchten statistischen Modelle ist das Modul zur Bestimmung der Anzahl der Gebäude von BSM hervorzuheben, da dessen Ergebnisse für die Anzahl der Gebäude mit einem mittleren Wert der prozentuale Differenz von 2% im „Prognosezeitraum“ am genauesten waren. Der Grund dafür liegt nicht nur darin, dass die für die Eingangsparameter erforderlichen Daten aus Studien des deutschen Gebäudebestandes stammen [11-14], sondern auch darin, dass die Berechnungsmethode mit der aktuellen Anzahl der Gebäude, der jährlichen Rate der abgerissenen und sanierten Gebäude sowie der jährlichen Rate der Neubauten ein breiteres Spektrum von Eingangsparametern berücksichtigt (s. Anhang D).

Die restlichen der vier statistischen Modelle in der Abb. 4.4 (REM, FfE-Gebäudemodell, BSM und MAED-2) zeigen ebenfalls ein hohes Maß an Genauigkeit. Der Mittelwert der prozentualen Differenz (MPD) liegt zwischen 6% und 7% für den Referenzzeitraum und zwischen 6% und 9% für den Prognosezeitraum (Tab. 4.5). Die Berechnungsmethode von MAED-2 ist hierbei hervorzuheben, weil die Modellergebnisse eine sehr starke Korrelation ( $r = 0,9$ ) zu den Daten des BMWi im „Referenzzeitraum“ aufweisen. Der Grund dafür besteht in der Verwendung von tatsächlichen Daten für die Gradtagzahlen im Referenzzeitraum, die nach dem im Unterabschnitt 4.1.2 beschriebenen Ansatz berücksichtigt wurden. Dies ermöglicht das Abbilden der tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Endenergieverbrauchs in Relation zu den klimatischen Bedingungen. Im Gegensatz dazu ist im Prognosezeitraum, bei dem entsprechend der Modellvorgaben ein durchschnittlicher Wert für die jährliche Gradtagzahl verwendet worden ist, eine sehr geringe Korrelation ( $r = -0,55$ ) zwischen den Modellergebnissen und den Daten des BMWi zu beobachten (Tab. 4.5).

Wie in der Tab. 4.4 erwähnt wurde, kann das REM-Modell nur den Endenergiebedarf für Raumwärme ermitteln und das FfE-Gebäudemodell nur den Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser bestimmen. Da das Ziel dieser Arbeit der Vergleich der Genauigkeit der Modelle bezüglich des gesamten Endenergieverbrauchs in allen Nutzungsbereichen (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung) ist, wurden für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei den Modellen REM und FfE-Gebäudemodell daher die statistischen Daten des Umweltbundesamtes [151] für den Endenergieverbrauch der fehlenden Nutzungsbereiche zu den Simulationsergebnissen addiert. Dieser Ansatz

wurde als geeignet erachtet, da der Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasserbereitung im deutschen Wohnungssektor den Großteil des gesamten Endenergieverbrauchs ausmacht ( $> 86\%$ ) [88]. Es sollte jedoch beachtet werden, dass die Verwendung von statistischen Daten zur Ergänzung der Ergebnisse der beiden Modelle (REM und FfE-Gebäudemodell) einen gewissen Grad an Verbesserung der Genauigkeit der Ergebnisse liefert. Beim Vergleich der jährlichen Ergebnisse des Endenergiebedarfs für Raumwärme von REM mit den statistischen Daten des Umweltbundesamtes zwischen 1990 und 2010 wurde ein relativer Abweichungsfehler von bis zu 21% erhalten. In diesem Zeitraum (1990 - 2010) betrug der Mittelwert der prozentualen Differenz (MPD) 7%. Beim Vergleich der mit REM erzielten Ergebnisse unter Einbeziehung der statistischen Werte für den Endenergieverbrauch der anderen Nutzungsbereiche (Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung) mit den Daten des BMWi reduziert sich der maximale relative Abweichungsfehler jedoch um drei Prozentpunkte. Der Mittelwert der prozentualen Differenz (MPD) verringert sich ebenfalls um einen Prozentpunkt. Das Gleiche gilt für die Ergebnisse des FfE-Gebäudemodells, wobei sich der maximale relative Abweichungsfehler um zwei Prozentpunkte und der Mittelwert der prozentualen Differenz (MPD) um einen Prozentpunkt reduziert.

Abb. 4.5 zeigt, dass alle bauphysikalischen Modelle, außer BREHOMES-A, für den deutschen Wohnungssektor Ergebnisse mit einem Mittelwert der prozentualen Differenz zwischen 5% und 9% liefern (Tab. 4.5). Die Simulation mit BREHOMES-A, welche die originale Berechnungsmethode von Shorrock und Dunster [20] verwendet, nach der die Anzahl der Wohnungen auf Projektionen für die Bevölkerungsentwicklung und der durchschnittlichen Wohnungsgröße bzw. dem Verhältnis zwischen Wohnfläche und der Anzahl der Nutzer basiert, liefert hingegen ungenaue Ergebnisse mit einem Mittelwert der prozentualen Differenz von 23%. Dies liegt daran, dass das Verhältnis zwischen Wohnfläche und der Anzahl der Nutzer im Algorithmus von BREDEM, d.h. dem Kernrechner von BREHOMES festgelegt wurde und nicht den Gegebenheiten in Deutschland entspricht. Shorrock und Dunster [20] haben jedoch in ihren Ausführungen bereits davor gewarnt, dass dieses Verhältnis nur ein grober Indikator ist und eine große Abweichung von der Realität aufweisen kann. Folglich wurde festgestellt, dass die mit Hilfe des Algorithmus von BREDEM ermittelte Anzahl der Wohnungen für den Betrachtungsfall Deutschland niedriger war als die tatsächliche Anzahl der Wohnungen nach DESTATIS [23]. Damit fiel, wie in Abb. 4.5 zu sehen ist, schlussendlich auch der Endenergieverbrauch im Wohnungssektor in der Simulation niedriger aus als die statistischen Daten. Dies zeigt, dass die originalen Berechnungsmethoden für UK nicht auf andere Länder übertragbar sind. BREDEM ermöglicht es weiterhin, unterschiedliche Werte für die Wohnfläche von verschiedenen Haus-Archetypen einzugeben, um eine Simulation durchzuführen, wobei in



**Abb. 4.5:** Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten Endenergieverbrauch im Referenz- und Prognosezeitraum und dem modellierten Endenergiebedarf der bauphysikalischen Modelle ECCABS, CDEM, BREHOMES-A (unter Berücksichtigung der ursprünglichen BREDEM Algorithmen für die Anzahl der Wohnungen) und BREHOMES-B (unter Berücksichtigung von Anpassungen der Original-Algorithmen)

der originalen Version das Verhältnis zwischen Wohnfläche und Anzahl der Nutzer jedoch immer im gleichen Wert von  $30,5 \text{ m}^2/\text{pro Person}$  resultiert. Allerdings hat sich das Verhältnis zwischen Wohnfläche und der Anzahl der Nutzer im Laufe der Zeit geändert wie Daten des Umweltbundesamtes belegen [151]. In Deutschland waren im Jahr 1950 beispielsweise  $11,7 \text{ m}^2$  Wohnfläche pro Person verfügbar und im Jahr 1990 insgesamt  $34,7 \text{ m}^2$  pro Person (Berechnung basierend auf [215, 253]). Aus den oben genannten Gründen wird deutlich, dass der Original-Algorithmus von BREHOMES zur Bestimmung der Anzahl der Wohnungen nicht übertragbar ist und eine Anpassung erforderlich ist, wenn der Endenergiebedarf in einem anderen Land als dem UK prognostiziert werden soll. Eine erneute Simulation mit BREHOMES (BREHOMES-B) nach der Anpassung des Verhältnisses zwischen Wohnfläche und der Anzahl der Nutzer zeigt, dass eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit der Ergebnisse erreicht werden kann mit einer Änderung im Mittelwert der prozentualen Differenz von 23% auf 6% (Tab. 4.5).

BREHOMES und CDEM verwenden beide BREDEM als Kernrechner zur Bestimmung des Endenergiebedarfs von einzelnen Haus-Archetypen. Zudem wurden für die Eingangsparameter die gleichen Datenquellen verwendet. Daher wären für diese beiden Modelle im Prinzip identische Ergebnisse für den Endenergiebedarf im deutschen Wohnungssektor zu erwarten. Da sich die beiden Modelle jedoch voneinander aufgrund des unterschiedlichen Aufschlüsselungsgrades des Wohnungsbestandes unterscheiden (s. Abschnitt 3.2), kommt

es zu den in Abb. 4.5 ersichtlichen Unterschieden in den Ergebnissen. Wie aus Tab. 3.1 ersichtlich ist, unterteilt CDEM den englischen Wohngebäudebestand in 47 verschiedene Haus- Archetypen, während in BREHOMES über 1.000 Gebäudekategorien betrachtet werden (s. Kapitel 3). Zur Replizierung der Unterschiede zwischen den beiden Modellen (BREHOMES und CDEM) und zur Überprüfung der Genauigkeit der Ergebnisse in Relation zum Aufschlüsselungsgrad des Gebäudebestandes, wurden für die Berechnung des Endenergieverbrauchs zwei verschiedene Unterteilungsgrade des deutschen Gebäudebestandes im Basisjahr 1990 verwendet. Für die Simulation mit BREHOMES wurde der deutsche Gebäudebestand auf Basis von Daten des IWU [215] in 32 Haus-Archetypen unterteilt. Für die Simulation mit CDEM hingegen, wurde die Gliederung anhand von 16 Haus-Archetypen vorgenommen. Es wurde eine Einteilung des Gebäudebestandes in vier Gebäudetypen (EFH, ZFH, MFH, GMFH) und vier Altersklassen (vor 1977, 1978–1984, 1985–1995, 1996–2000) vorgenommen, welche den Jahren mit Novellen zur Wärmeschutzverordnung entsprechen (s. Anhang B, Abschnitt B.1). Allerdings ist anzumerken, dass das Verhältnis der Anzahl der Haus-Archetypen für beide Modelle im englischen bzw. deutschen Wohnungssektor nicht vergleichbar ist.

Zur Prognose des Endenergiebedarfs im „Prognosezeitraum“ verwendet BREHOMES im BREDEM Kernrechner Sättigungskurven (S-Kurven) und einen gemittelten Haus-Archetypen, der sich aus gemittelten sowie detailliert aufgeschlüsselten Daten für den Gebäudebestand ableitet [20]. Dagegen nutzt CDEM Sättigungskurven und die in BREDEM berechneten Prognosen für den Endenergiebedarf jedes einzelnen der 16 Haus-Archetypen. Abb. 4.5 und Tab. 4.5 zeigen, dass es keinen bedeutenden Unterschied zwischen den mit CDEM und BREHOMES-B erzielten Ergebnissen für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor gibt und dass der Unterschied des Mittelwertes der prozentualen Differenz zwischen beiden Ergebnissen nicht höher als ein Prozentpunkt liegt. Da der Unterschied in den Ergebnissen beider Modelle im „Prognosezeitraum“ nicht signifikant ist, kann das Berechnungsverfahren von BREHOMES aufgrund der einfacheren Handhabbarkeit des Modellierungsprozesses perspektivisch als ausreichend betrachtet werden, da es die Dateneingabe erleichtert und weniger Zeit für die Modellierung beansprucht als CDEM. Ist das Ziel der Modellierung jedoch eine detaillierte Analyse des Einflusses von Maßnahmen wie die Renovierung von alten Gebäuden oder die Verbesserung der Wärmedämmung einer bestimmten Altersgruppe von Gebäuden, dann kann dies mit dem Berechnungsverfahren von CDEM abgebildet werden, was mit BREHOMES nicht möglich ist.

Der Vergleich der mit den statistischen und den bauphysikalischen Modellierungsansätzen erzielten Ergebnisse zeigt, dass während die statistischen Modelle (Abb. 4.4) eine kontinuierliche Erhöhung des Endenergiebedarfs über die Jahre prognostizieren bei den



Ergebnissen der bauphysikalischen Modelle (Abb. 4.5) nur eine geringe Erhöhung des Endenergiebedarfs zu beobachten ist. Der Grund besteht darin, dass die statistischen Modelle Projektionen auf der Basis von Trends anstellen, während bei den bauphysikalischen Modellen detailliertere Berechnungsmethoden in die Modellierung integriert sind. Hierzu ist anzumerken, dass bei den als am einflussreichsten identifizierten Parametern, d.h. der Anzahl der Wohnungen und dem spezifischen Endenergieverbrauch für Raumwärme (s. Ausführungen zur Sensitivitätsanalyse im Unterabschnitt 4.2.3) im „Referenzzeitraum“ eine kontinuierliche Zunahme zu verzeichnen war. Dieser Trend wird von den statistischen Modellen folglich in den „Prognosezeitraum“ projiziert. Dagegen verwenden die bauphysikalischen Modelle Projektionen des Trends für die Anzahl der Wohnungen im Zusammenhang mit Berechnungen zu den Auswirkungen von Energieeinsparmaßnahmen, die auf Basis von Sättigungskurven betrachtet werden. Da eine steigende Anzahl von Wohnungen zu einer Zunahme des Endenergiebedarfs führt und die Umsetzung von Energieeinsparmaßnahmen gleichzeitig eine Abnahme des Endenergiebedarfs zur Folge hat, ist in Summe eine geringere Steigerung des Endenergiebedarfs zu verzeichnen als bei den statistischen Modellen, was wie die Abb. 4.4 und Abb. 4.5 sowie Tab. 4.5 zeigen letztendlich den statistischen Daten des BMWi besser entspricht.

**Tab. 4.5:** Ergebnisse für die Genauigkeit der übertragbaren Modelle für das Fallbeispiel des deutschen Wohnungssektors entsprechend den im Abschnitt 4.1 definierten Parametern

	Statistische Modelle						Bauphysikalische Modelle			
	REM	BSM	MAED-2	FfE-Gebäudemodell	LEAP-A	LEAP-B	ECCABS	CDEM	BREHOMES-A	BREHOMES-B
<b>Referenzzeitraum</b>										
Relativer Abweichungsfehler (%)	≤ 15	≤ 20	≤ 10	≤ 14	≤ 13	≤ 13	≤ 16	≤ 17	≤ 24	≤ 16
Mittelwert der prozentualen Differenz (%)	6	12	7	7	5	5	8	9	15	8
Korrelationskoeffizient r	-0.14	0.8	0.90	-0.74	0.62	0.62	0.57	-0.13	-0.53	0.34
Bestimmtheitsmaß r <sup>2</sup>	0.02	0.64	0.81	0.55	0.38	0.38	0.32	0.02	0.28	0.12
<b>Prognosezeitraum</b>										
Relativer Abweichungsfehler (%)	≤ 18	≤ 19	≤ 26	≤ 16	≤ 50	≤ 34	≤ 14	≤ 14	≤ 26	≤ 14
Mittelwert der prozentualen Differenz (%)	6	11	9	6	27	16	5	7	23	6
Korrelationskoeffizient r	-0.74	-0.57	-0.55	-0.69	-0.67	-0.67	-0.67	-0.59	0.75	-0.62
Bestimmtheitsmaß r <sup>2</sup>	0.55	0.32	0.30	0.48	0.45	0.45	0.45	0.35	0.56	0.38

Tab. 4.5 zeigt, dass beide Modellierungsansätze, statistisch und bauphysikalisch, im „Referenzzeitraum“ ähnliche Ergebnisse für die Genauigkeit des Endenergieverbrauchs liefern mit einem Mittelwert der prozentualen Differenz von zwischen 5% und 15%. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass nur drei Modelle (REM, FfE-Gebäudemodell und CDEM) eine sehr schwache Korrelation  $r$  zu den BMWi Daten haben. Die anderen Modelle besitzen eine mittlere oder sehr starke Korrelation gemäß der in der Tab. 4.1 aufgeführten Definition. Das Modell mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß  $r^2$  ist ein statistisches Modell (MAED-2). Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass für die Simulation mit MAED-2 im „Referenzzeitraum“ die statischen Werte für die Gradtagzahlen verwendet werden konnten. Dies erhöht die Korrelation zwischen den Ergebnissen des Modells und den Daten des BMWi, weil bei der Ermittlung des Endenergieverbrauchs gemäß BMWi auch der Einfluss des Klimas für jedes einzelne Jahr berücksichtigt wurde [229]. Außerdem ist die Methode von der AGEb (AG Energiebilanzen e.V.) [229] zur Ermittlung des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor der Methodologie von MAED-2 sehr ähnlich. Daher waren ähnliche Ergebnisse für den „Referenzzeitraum“ zu erwarten. Im Gegensatz zu MEAD-2 kann die Berechnungsmethode der AGEb jedoch nicht dafür verwendet werden, um eine Prognose des zukünftigen Energiebedarfs im Wohnungssektor aufzustellen [229].

Im Hinblick auf die in Tab. 4.5 gezeigten Werte kann darauf geschlossen werden, dass die acht übertragbaren Modelle (REM, BSM, MAED-2, FfE-Gebäudemodell, LEAP-B, ECCABS, CDEM, BREHOMES-B) grundsätzlich in der Lage sind, den Endenergieverbrauch in einem anderen Land zu quantifizieren, als dem für das sie ursprünglich erstellt worden sind, wenngleich für einzelne Modelle (BREHOMES) bereits für Simulationen im „Referenzzeitraum“ Anpassungen erforderlich sind. Außerdem ist festzustellen, dass es keine wesentlichen Unterschiede zwischen der Genauigkeit der Modelle mit einem hohen (bauphysikalische Modelle) und einem niedrigeren (statistische Modelle) Detaillierungsgrad gibt.

Hervorzuheben ist, dass die Ergebnisse der drei relevanten bauphysikalischen Modelle (ECCABS, CDEM, BREHOMES-B) sich in ihrer Genauigkeit im „Prognosezeitraum“ im Vergleich zum „Referenzzeitraum“ erhöhen, während sich ein solcher Trend für die statistischen Modelle nicht feststellen lässt. Tab. 4.5 zeigt weiterhin im „Referenzzeitraum“ für die meisten Modelle einen positiven Korrelationskoeffizienten  $r$ . Im „Prognosezeitraum“ waren dagegen die Werte des Korrelationskoeffizienten für die Mehrzahl der Modelle negativ. Ursache ist, dass die meisten Modelle eine Zunahme des Endenergiebedarfs prognostiziert haben. Die Daten des BMWi zeigen hingegen eine Abnahme des Endenergieverbrauchs ab 2001.

### 4.2.3 Sensitivitätsanalyse

Im Jahr 2010 präsentierten Firth et al. [62] das erste Modell im Wohnungssektor, das eine Sensitivitätsanalyse als Bestandteil der Modellentwicklung beinhaltet: CDEM. Dieses Modell verwendet BREDEM als Kernrechner mit Daten aus dem „English House Condition Survey 2001“ (EHCS) als Eingangsparameter [254]. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse von Firth et al. verdeutlichen, dass die einflussreichsten Parameter auf das CDEM-Modell die Innentemperatur ( $S_{i,j} = 1,55$ ) gefolgt von der Außentemperatur ( $S_{i,j} = -0,58$ ) und dem Nutzungsgrad der Heizungsanlage ( $S_{i,j} = -0,58$ ) [62] sind. Die negativen Werte für den normalisierten Sensitivitätskoeffizienten  $S_{i,j}$  (NSC) bedeuten hierbei eine umgekehrte Proportionalität der Eingangsparameter zum Ausgangsparameter CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dies heißt, zum Beispiel, dass eine Erhöhung des Eingangsparameters Nutzungsgrad der Heizungsanlage eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bewirkt.

Im Jahr 2011 präsentierten Cheng und Steemers [24] das DECM-Modell, welches ebenfalls durch eine Sensitivitätsanalyse ergänzt wurde. DECM verwendet als Kernrechner das „Standard Assessment Procedure“ (SAP-2005) der britischen Regierung [178], welches eine vereinfachte Version des BREDEM-12 Kernrechners darstellt [38]. Die Daten für die Eingangsparameter für DECM stammen hierbei aus dem „English House Condition Survey 2007“ (EHCS) [30]. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse, die sich auf die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen englischer Wohngebäude beziehen, belegen, dass auch für das DECM-Modell die Innentemperatur ( $S_{i,j} = 1,55$ ) den einflussreichsten Parameter darstellt, in diesem Fall allerdings gefolgt von der Wohnfläche ( $S_{i,j} = 0,77$ ) und der Außentemperatur ( $S_{i,j} = -0,61$ ) [24]. Obwohl bei beiden Modellen die Innentemperatur als einflussreichster Eingangsparameter identifiziert wurde und dies sogar mit einem identischen normalisierten Sensitivitätskoeffizienten ( $S_{i,j} = 1,55$ ), stimmen sie nicht in ihrer Bewertung des Einflusses der anderen Eingangsparameter auf die Modellierung überein. Laut Cheng und Steemers [24] liegen die Ursachen dieser Inkonsistenz hauptsächlich in den unterschiedlichen Annahmen für die Modellierung sowie den verschiedenen Datenquellen für die Eingangsparameter begründet.

Hughes et al. [26] haben 2013 das „Cambridge Housing Model“ (CHM) inklusive einer Sensitivitätsanalyse vorgestellt. Ebenso wie das DECM-Modell nutzt CHM Daten des englischen Wohngebäudebestandes für die Eingangsparameter, in diesem Fall dem English Housing Survey 2011 [255]. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass der einflussreichste Parameter auf das CHM-Modell wiederum die Innentemperatur ( $S_{i,j} = 1,54$ ) ist, in diesem Fall gefolgt vom Nutzungsgrad der Heizungsanlage ( $S_{i,j} = -0,66$ ) und der

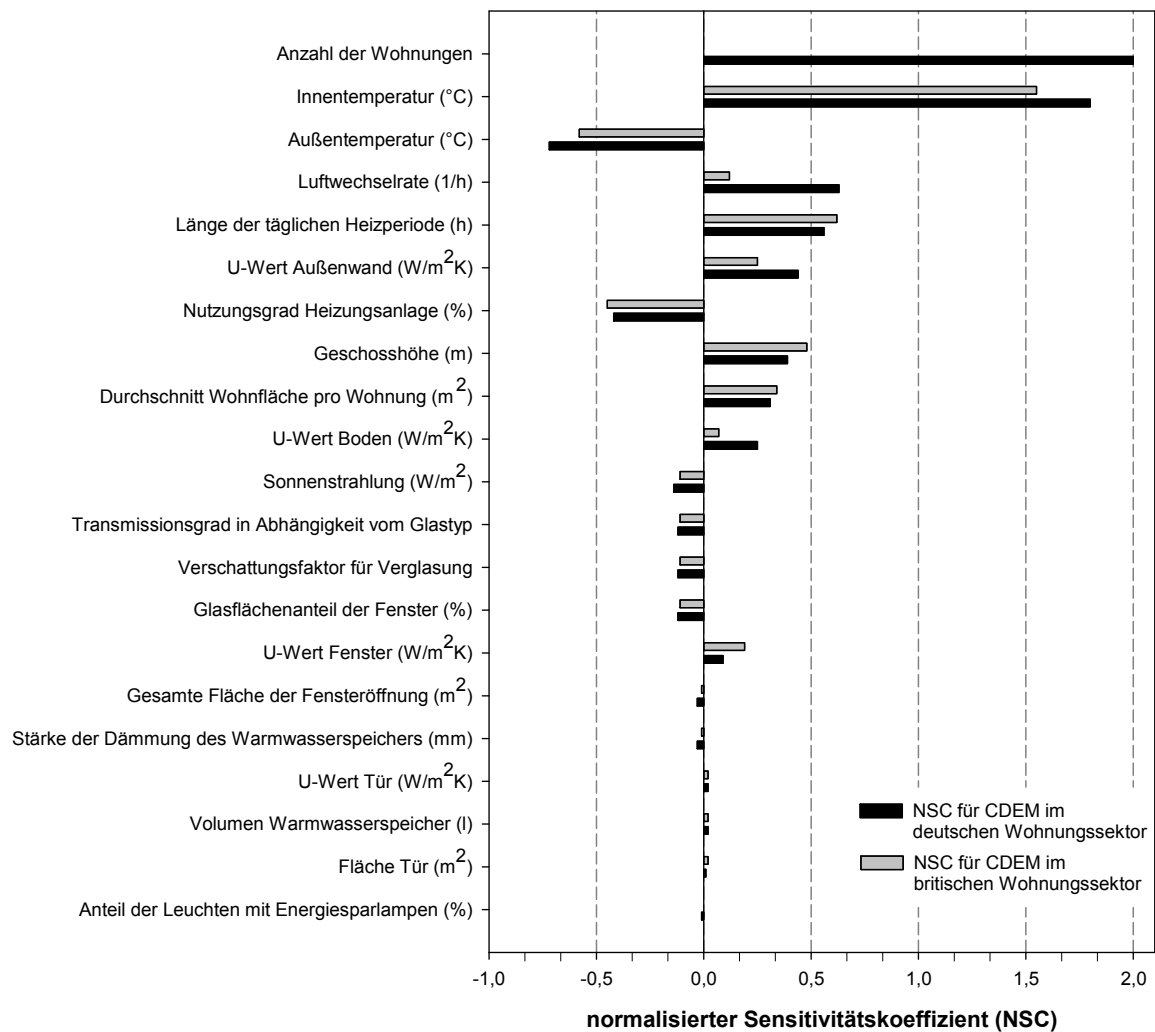
Außentemperatur ( $S_{i,j} = -0,59$ ) [26]. Hughes et al. [26] haben ihre Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit den Ergebnissen von Firth et al. [62] verglichen und betonten die allgemeine Übereinstimmung der Ergebnisse. Allerdings wurden Gründe für die vorhandenen Unterschiede zwischen den normalisierten Sensitivitätskoeffizienten der Eingangsparameter nicht diskutiert, was jedoch insbesondere für die einflussreichen Parameter Nutzungsgrad der Heizungsanlage und Wohnfläche von Interesse wäre.

Im Jahr 2013 stellten McKenna et al. [27] das BSM-Modell vor, welches entwickelt wurde, um den Endenergiebedarf im deutschen Wohnungssektor zu prognostizieren. Die Daten für die Eingangsparameter des BSM-Modells stammen hierbei vom BBSR [12], DESTATIS [23, 216, 243] und der Bayern LB [14]. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des BSM-Modells, die von McKenna et al. [27] durchgeführt wurde, zeigen, dass die einflussreichsten Parameter auf das BSM-Modell die Sanierungsrate der Gebäude ( $S_{i,j} = 0,54$ ), die Gebäude-Ersatzrate ( $S_{i,j} = 0,2$ ) und die Renovierungswahrscheinlichkeit ( $S_{i,j} = 0,1$ ) sind.

Bei einem Vergleich der Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen der vier Modelle CDEM, DCEM, CHM und BSM ist festzuhalten, dass es nicht nur einen Unterschied zwischen den einzelnen Werten für die normalisierten Sensitivitätskoeffizienten  $S_{i,j}$  gibt, sondern auch, dass in Abhängigkeit des Modellierungsansatzes die Rangfolge beziehungsweise die Art der einflussreichsten Eingangsparameter für verschiedene Modelle divergieren kann.

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse herzustellen, wurden anhand des deutschen Wohnungssektors jeweils eine Sensitivitätsanalyse für die acht übertragbaren Modelle durchgeführt und die resultierenden normalisierten Sensitivitätskoeffizienten ( $S_{i,j}$ ) anschließend in absteigender Reihenfolge sortiert. Dies wird für die Modelle CDEM und MAED-2 in Abb. 4.6 und Abb. 4.7 beispielhaft dargestellt (s. Anhang D für die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen aller acht Modelle). Wie zu erwarten war, wurde festgestellt, dass es eine Vielzahl an Eingangsparametern gibt, die zwischen den einzelnen Modellen schwierig zu verbinden und zu vergleichen sind.

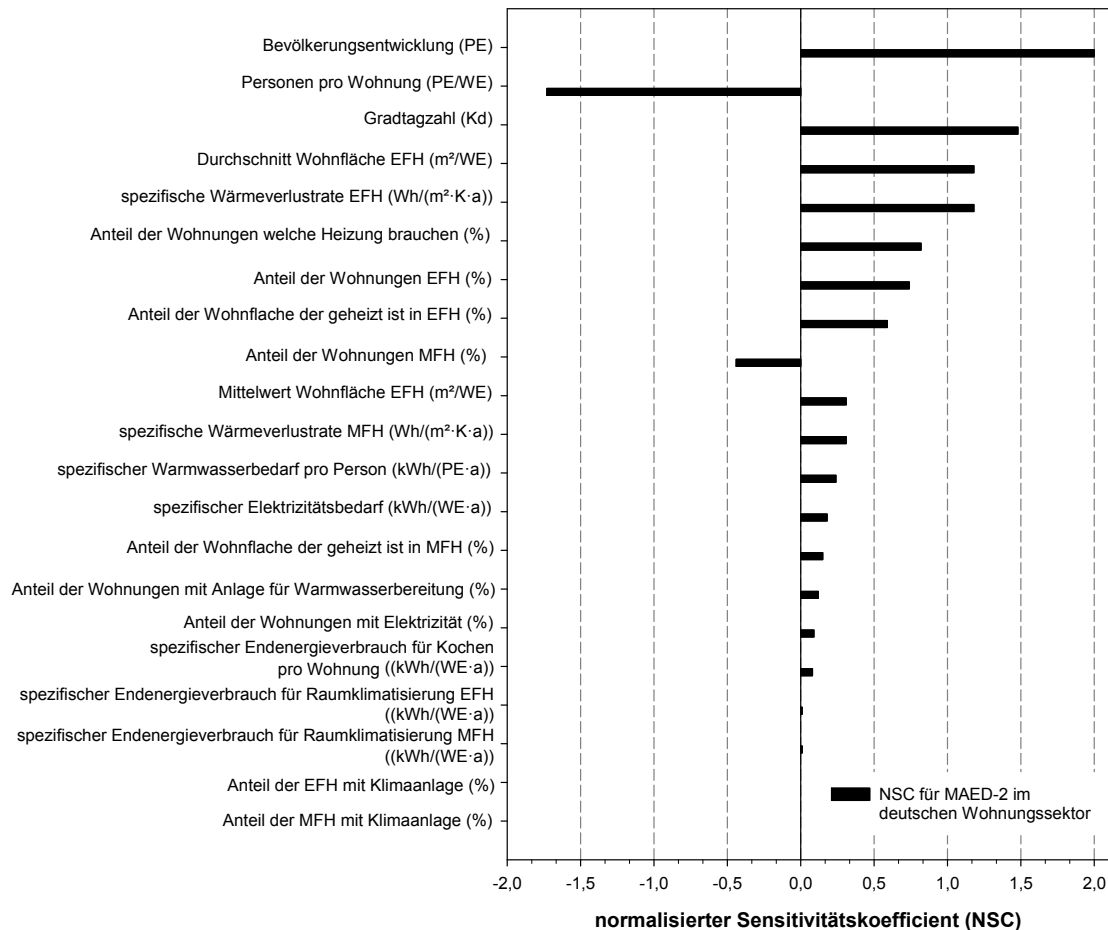
Wie bereits in Abschnitt 4.1 deutlich wurde, kann ein normalisierter Sensitivitätskoeffizient, d.h. die Variation des Ausgangsparameters, direkt (für positive  $S_{i,j}$ ) oder indirekt (für negative  $S_{i,j}$ ) proportional zu einer 1% Variation des jeweiligen Eingangsparameters sein. So besitzt zum Beispiel der Eingangsparameter „Bevölkerungsentwicklung“ im MAED-2-Modell einen normalisierten Sensitivitätskoeffizienten  $S_{i,j}$  von 1,98 (Abb. 4.7). Das bedeutet, dass sich ein Bevölkerungswachstum von 1% mit 1,98% auf den Endenergiebedarf auswirkt. Dagegen ergibt nach dem MAED-2-Modell eine 1%ige Erhöhung des Eingangsparameters „Personen pro Wohnung“ eine 1,73%ige Reduktion des Endenergieverbrauchs ( $S_{i,j} = -1,73$ ).



**Abb. 4.6:** Vergleich der Ergebnisse der mit CDEM für den britischen und den deutschen Wohnungssektor erzielten normalisierten Sensitivitätskoeffizienten, Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des britische Wohnungssektors aus Datenquelle: [62]

Abb. 4.6 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des Modells CDEM zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im britischen Wohnungssektor wie sie von Firth et al. [62] angegeben werden im Vergleich zu den Ergebnissen für den deutschen Wohnungssektor, die im Rahmen dieser Arbeit ermittelt wurden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die einflussreichsten Parameter für dasselbe Modell mit verschiedenen Rahmenbedingungen variieren, d.h. wenn unterschiedliche Länder betrachtet werden. Weiterhin ist in Abb. 4.6 zu sehen, dass der Einfluss der Anzahl der Wohnungen von Firth et al. [62] nicht in der Sensitivitätsanalyse quantifiziert wurde. Dies liegt daran, dass Firth et al. [62] die Zielstellung hatten, den Einfluss der Eingangsparameter auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines repräsentativen Haus-Archetypen zu bewerten. Für den hier betrachteten Fall des deut-

schen Wohnungssektors wurde die Anzahl der Wohnungen jedoch mit berücksichtigt, da ein Ziel dieser Arbeit die Analyse des Einflusses der Eingangsparameter auf den Endenergieverbrauch/die CO<sub>2</sub>-Emissionen des gesamten Wohnungssektors ist.



**Abb. 4.7:** Ergebnisse der mit MAED-2 für den deutschen Wohnungssektors erzielten normalisierten Sensitivitätskoeffizienten (EFH – Einfamilienhaus, MFH – Mehrfamilienhaus)

Werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse eines anderen Modells als CDEM betrachtet, wird eine andere Reihenfolge für den Einfluss der einzelnen Parameter erhalten. Dies ist im Vergleich der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse von CDEM in Abb. 4.6 mit den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse von MAED-2 in Abb. 4.7 zu erkennen. Hierbei ist deutlich zu sehen, dass ein Vergleich des Einflusses der Eingangsparameter von Modellen mit unterschiedlichen Modellierungsansätzen nur sehr schwer möglich ist.

Abb. 4.6 zeigt, dass die fünf einflussreichsten Eingangsparameter für CDEM die Anzahl der Wohnungen, die Innentemperatur, die Außentemperatur, die Luftwechselrate und die Länge der täglichen Heizperiode sind. Abb. 4.7 ist zu entnehmen, dass für MAED-2 die

fünf einflussreichsten Eingangsparameter die Bevölkerungsentwicklung, die Anzahl der Personen pro Wohnung, die Gradtagzahl, die Wohnfläche der Wohnungen und der spezifische Wärmeverlust der Wohnungen sind.

Bei einem Vergleich aller acht Modelle wird die Situation noch komplexer, weil die Vielfalt und die Anzahl der Eingangsparameter wesentlich höher sind. Dennoch ist zu beobachten, dass beim Ordnen der normalisierten Sensitivitätskoeffizienten der einzelnen Modelle nach Einfluss die folgende Sequenz für die einflussreichsten Eingangsparameter in abnehmender Reihenfolge bei allen Modellen auftritt: (1) die Anzahl der Wohnungen/Gebäude und (2) der spezifische Energieverbrauch für (a) Raumwärme, (b) Warmwasserbereitung und (c) Elektrogeräte und Beleuchtung. Allerdings sind diese vier Eingangsparameter häufig nicht direkt Eingaben für die jeweiligen Modelle. Wenn also zum Beispiel wie bei MAED-2 die beiden einflussreichsten Eingangsparameter die Bevölkerungsentwicklung und die Anzahl der Personen pro Wohnung sind, dann werden diese beiden Eingangsparameter dazu verwendet, um die Anzahl der Wohnungen zu bestimmen, d.h. den einflussreichsten gemeinsamen Parameter über alle Modelle. Um beispielsweise den spezifischen Energieverbrauch für Raumwärme zu bestimmen, können ebenfalls mehrere Eingangsparameter notwendig sein. Im Fall von CDEM zum Beispiel werden die einflussreichsten Eingangsparameter nach der Anzahl der Wohnungen, d.h. die Innentemperatur, die Außentemperatur, die Luftwechselrate und die Länge der täglichen Heizperiode dazu verwendet, um den Endenergiebedarf für Raumwärme zu quantifizieren. Der gleiche Ausgangsparameter (Endenergiebedarf für Raumwärme) wird im Modell MAED-2 hingegen mit den nach der Bevölkerungsentwicklung und der Anzahl der Personen pro Wohnung nächsten drei einflussreichsten Eingangsparametern bestimmt, und zwar der Gradtagzahl, der Wohnfläche des Haus-Archetypen und dem spezifischen Wärmeverlust des Haus-Archetypen. Dies zeigt, dass es eine intrinsische Übereinstimmung zwischen den einzelnen Modellen gibt und dass der Unterschied im Aufschlüsselungsgrad der Eingangsparameter liegt, die zur Bestimmung des Endenergiebedarfs verwendet werden.

Auf Grundlage dieser Beobachtung wird in der Tab. 4.6 eine Gruppierung der Eingangsparameter nach ihrem Einfluss- und Aufschlüsselungsgrad vorgenommen. Tab. 4.6 zeigt exemplarisch zwei Aufschlüsselungsgrade, welche in Bezug auf den „Detaillierungsgrad“ der untersuchten Modelle bestimmt wurden. Wie bereits im Abschnitt 3.2 erwähnt, verwenden Modelle mit einem niedrigen Detaillierungsgrad, z.B. LEAP Eingangsparameter mit geringem Aufschlüsselungsgrad, wie die Anzahl der Wohnungen und den spezifischen Endenergieverbrauch nach Nutzungsbereichen (Raumwärme, Warmwasserbereitung, Elektrogeräte und Beleuchtung). Dagegen verwenden Modelle mit einem höheren Detaillierungsgrad,

wie CDEM oder BREHOMES, Eingangsparameter mit einem höheren Aufschlüsselungsgrad, z.B. Innentemperatur, U-Werte, Sonnenstrahlung oder Luftwechselrate. Es muss jedoch angemerkt werden, dass die Gruppierung der Eingangsparameter nach Einflussgrad, die in der Tab. 4.6 gezeigt wird, auf der Sensitivitätsanalyse der acht untersuchten Modelle für den deutschen Wohnungssektors basiert. Daher kann diese Gruppierung für andere Länder unterschiedlich ausfallen, insbesondere für Länder, in denen der Kühlenergiebedarf größer ist als der Heizenergiebedarf.

**Tab. 4.6:** Gruppierung der Eingangsparameter für Energiemodelle im Wohnungssektor nach ihrem Einfluss- und Aufschlüsselungsgrad

<b>Einflussgrad</b>	<b>Primäre Ebene für den Aufschlüsselungsgrad (Modelle mit niedrigem Detaillierungsgrad)</b>	<b>Sekundäre Ebene für den Aufschlüsselungsgrad (Modelle mit hohem Detaillierungsgrad)</b>
<b>Starker Einfluss</b> (eine 1%ige Variation dieses Eingangsparameters bewirkt eine mehr als 1% Variation des Endenergiebedarfs: $S_{ij} > 1$ )	Anzahl der Wohnungen	- Anzahl der Einwohner - Personen pro Wohnung - Personen pro Wohnfläche
	Spezifischer Endenergiebedarf für Raumwärme	- Innentemperatur - Gradtagzahlen - Außentemperatur - Nutzungsgrad der Heizungsanlagen - Luftwechselrate - U-Werte und Fläche der Bauteile (Wände, Dach, Boden, Fenster)
<b>Mittlerer Einfluss</b> (eine 1%ige Variation dieses Eingangsparameters bewirkt eine Variation zwischen 0,1% und 1% des Endenergiebedarfs: $1 \geq S_{ij} \geq 0,1$ )	Spezifischer Endenergiebedarf für Warmwasser	- Nutzungsgrad der Warmwasseranlagen - Personen pro Wohnung/Wohnfläche
<b>Niedriger Einfluss</b> (eine 1%ige Variation dieses Eingangsparameters bewirkt eine weniger als 0,1% Variation des Endenergiebedarfs: $0,1 > S_{ij}$ )	Spezifischer Endenergiebedarf für Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung	- Nutzungsgrad der Elektrogeräte und Leuchten - Personen pro Wohnung/Wohnfläche

#### 4.2.4 Unsicherheit

Die Ergebnisse der MCA zeigen, dass die möglichen Variationen der Eingangsparameter zu erheblichen Unsicherheiten führen, auch wenn Modellanpassungen vorgenommen werden, wie bereits am Anfang dieses Kapitels diskutiert wurde.

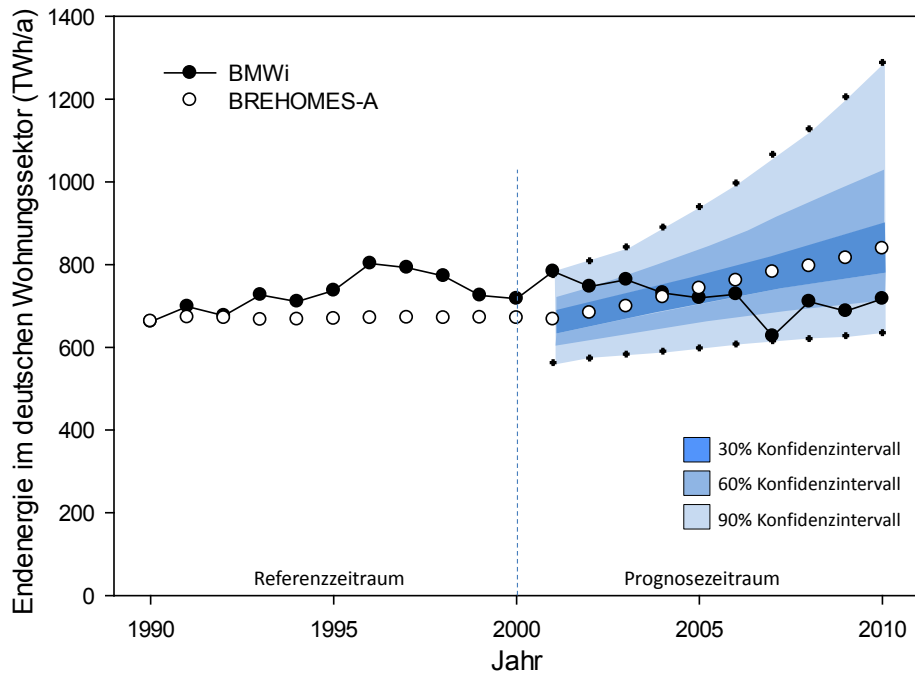


Die Abb. 4.8 und Abb. 4.9 verdeutlichen die Ergebnisse der MCA für BREHOMES, wobei Abb. 4.8 die Ergebnisse der Simulation mit BREHOMES-A darstellt, welche den originalen Algorithmus des Kernrechners BREDEM [38] verwendet und Abb. 4.9 die Ergebnisse der Simulation mit BREHOMES-B unter Berücksichtigung von Anpassungen der Original-Algorithmen (s. Unterabschnitt 4.2.2). Die Ergebnisse zeigen, dass die Breite für das Wahrscheinlichkeitsband des 30%igen Konfidenzintervalls für BREHOMES-A anfänglich relativ ähnlich zum 30%igen Konfidenzintervall des Wahrscheinlichkeitsbands von BREHOMES-B ist. Mit der Zeit erhöht sich die Gesamtunsicherheit der Ergebnisse von BREHOMES-A jedoch deutlich. Bei den Konfidenzintervallen von 60% und 90% tritt dies noch klarer zu Tage. So liegt das Wahrscheinlichkeitsband für das 90%ige Konfidenzintervall von BREHOMES-A am Ende des Betrachtungszeitraumes im Jahr 2010 zwischen -24% und + 54% gegenüber dem modellierten Mittelwert für den Endenergiebedarf im deutschen Wohnungssektor.

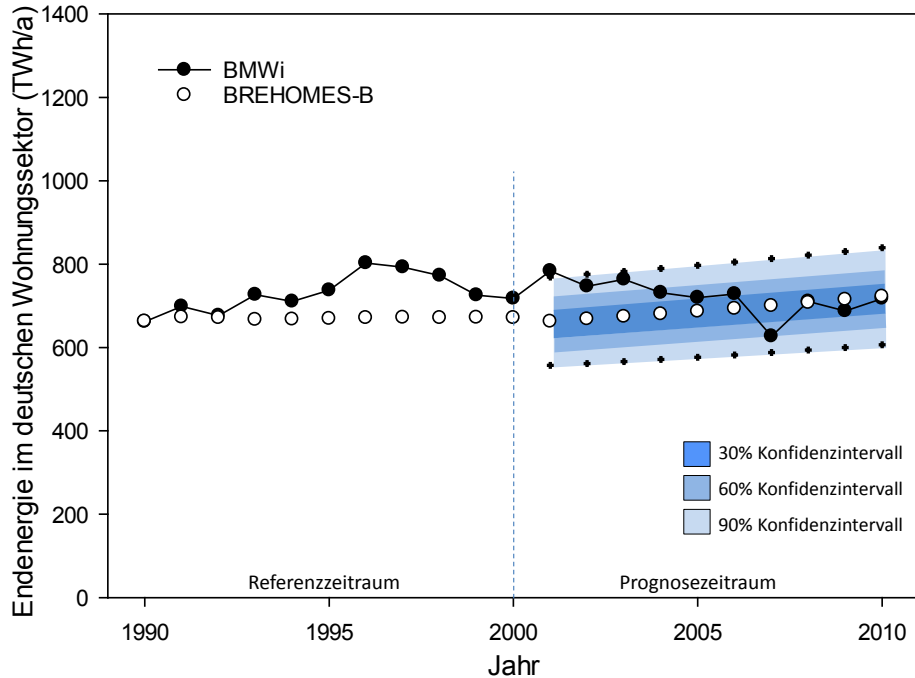
Abb. 4.9 zeigt, dass die Simulation mit BREHOMES-B, das ein Modell mit hohem Detaillierungsgrad darstellt, über den gesamten „Prognosezeitraum“ Ergebnisse mit einer gleichbleibenden Unsicherheit liefert. Das Wahrscheinlichkeitsband für das 90%ige Konfidenzintervall liegt zwischen -16% und +16% im Vergleich zum modellierten Mittelwert für den Endenergiebedarf im deutschen Wohnungssektor. Weiterhin ist in Abb. 4.8 und Abb. 4.9 zu sehen, dass die statistischen Werte für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor nach BMWi innerhalb des Wahrscheinlichkeitsbandes der Simulationen mit BREHOMES liegen.

Modelle mit einem niedrigen Detaillierungsgrad wie LEAP oder BSM zeigen ein Wahrscheinlichkeitsband in Trapezform wie aus Abb. 4.10 und Abb. 4.11 ersichtlich wird. Wie bereits ausgeführt (s. Abschnitt 3.3) haben für diese beiden Modelle die Eingangsparameter der Anzahl der Wohnungen und des spezifischen Endenergiebedarfs pro Wohnung einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Modellierung. Da diese Eingangsparameter in Deutschland gegenläufige Tendenzen in Ihrer Entwicklung aufweisen mit einer steigenden Anzahl an Wohneinheiten bei gleichzeitig sinkendem spezifischem Endenergiebedarf pro Wohnung, steigt die Unsicherheit der Ergebnisse im Laufe der Zeit. So entstehen, wie in Abb. 4.10 und Abb. 4.11 zu sehen ist, am Ende des „Prognosezeitraumes“ breitere Wahrscheinlichkeitsbänder als an dessen Anfang.

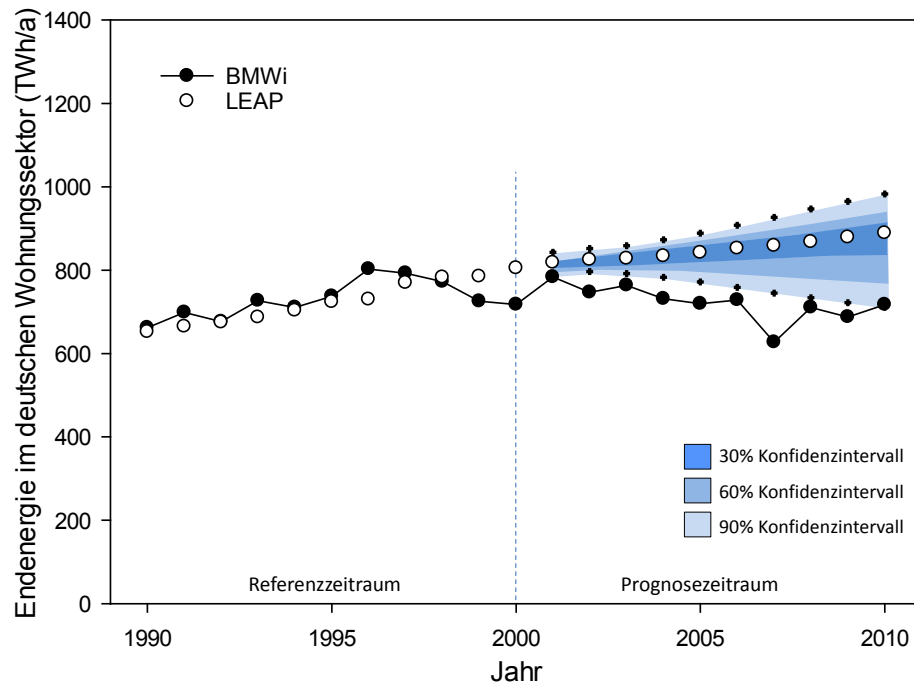
Abb. 4.12 und Abb. 4.13 zeigen die Ergebnisse der MCA für das FfE-Gebäudemodell und das Modell REM. Diese Modelle haben einen mittleren Detaillierungsgrad und besitzen ein relativ ähnliches Berechnungsverfahren. Beide Modelle unterteilen den Wohngebäudebestand in Haus-Archetypen (oder Units) mit einem durchschnittlichen Endenergie-



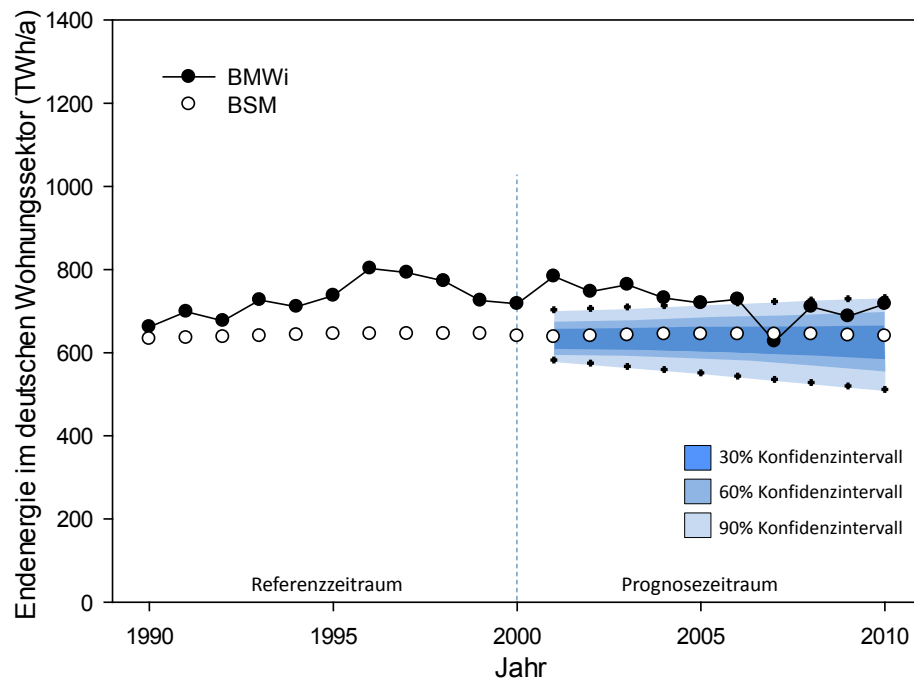
**Abb. 4.8:** Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit BREHOMES-A berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern)



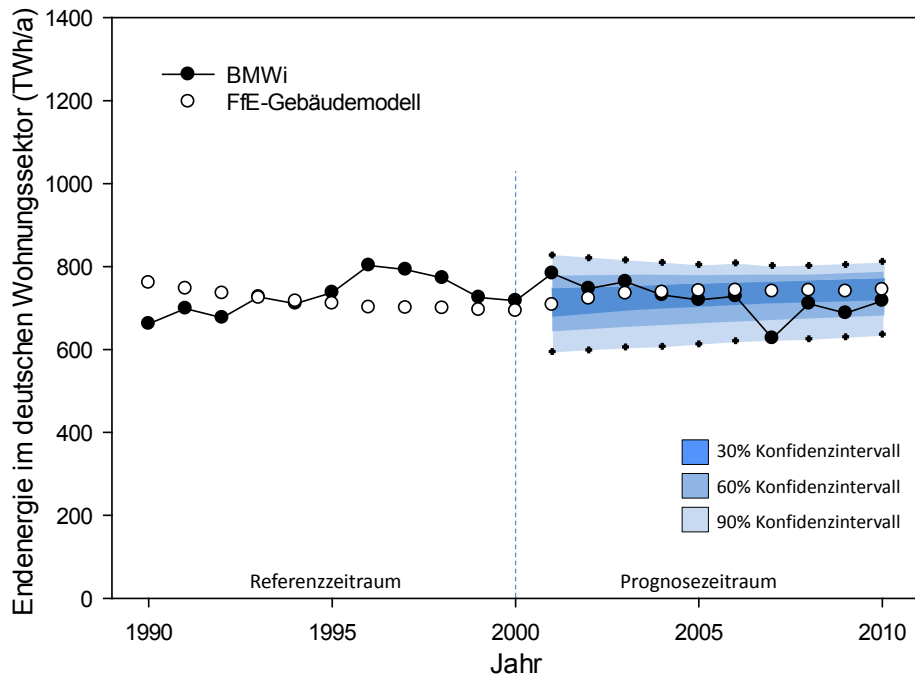
**Abb. 4.9:** Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit BREHOMES-B berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern)



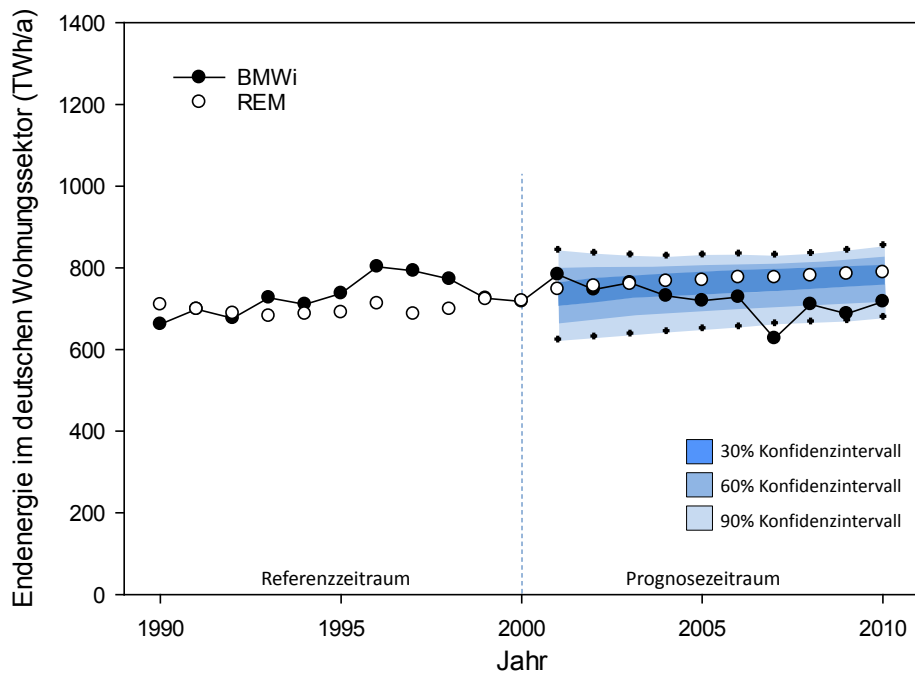
**Abb. 4.10:** Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit LEAP berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern)



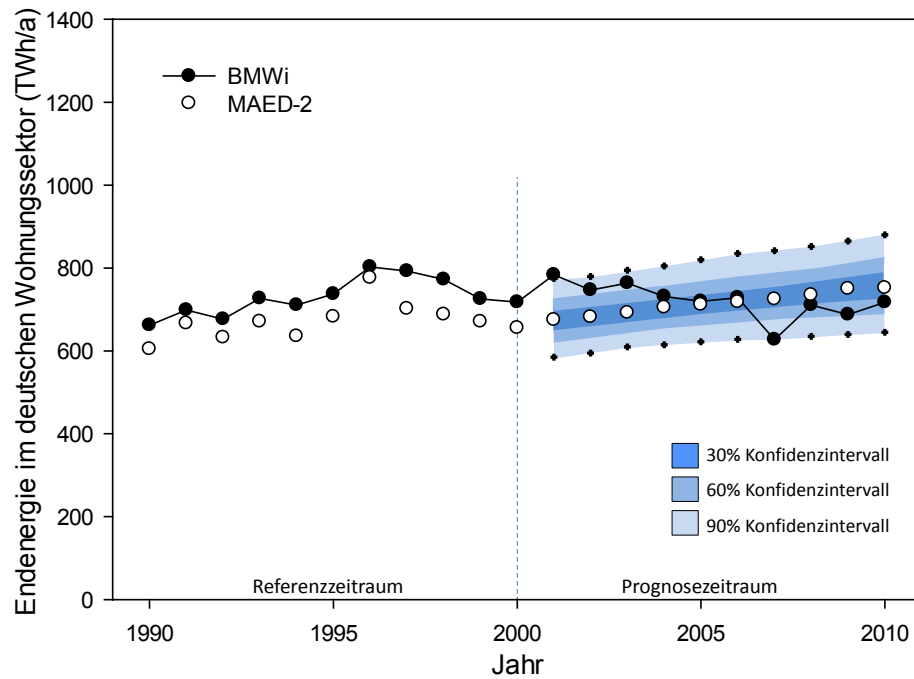
**Abb. 4.11:** Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit BSM berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern)



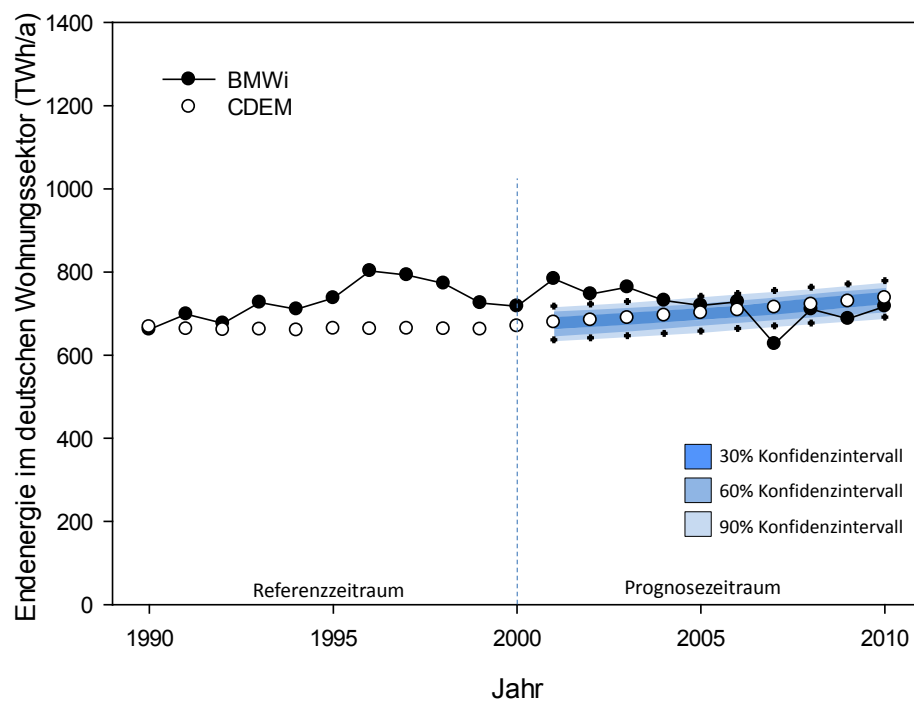
**Abb. 4.12:** Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit FfE-Gebäudemodell berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern)



**Abb. 4.13:** Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit REM berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern)



**Abb. 4.14:** Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit MAED-2 berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern)



**Abb. 4.15:** Vergleich zwischen dem vom BMWi [64] ermittelten und dem mit CDEM berechneten Endenergiebedarf (inklusive Wahrscheinlichkeitsbändern)

verbrauch pro Wohnfläche ( $kWh/m^2a$ ). In beiden Modellen wird die Bestimmung des Endenergiebedarfs stark vom Nutzungsgrad der Heizungsanlagen beeinflusst. Im ersten Jahr des „Prognosezeitraumes“ ist die Bandbreite der wahrscheinlichen Werte für den Nutzungsgrad der Anlagen deutlich höher mit Werten zwischen 71% und 98% als am Ende des simulierten Jahrzehntes mit 81% bis 99%. Dies hat ein breiteres Wahrscheinlichkeitsband an möglichen Werten für den Endenergiebedarf am Anfang des Prognosezeitraumes zur Folge, das im Laufe der Zeit (2001-2010) schmaler wird.

Abb. 4.14 und Abb. 4.15 zeigen die Ergebnisse der MCA für die neben BREHOMES verbleibenden Modelle mit hohem Detaillierungsgrad MAED-2 und CDEM. Für beide Modelle ist zu sehen, dass die Wahrscheinlichkeitsbänder eine parallele Form aufweisen. Das gleiche Ergebnis gilt für die Modellierung mit BREHOMES-B. Die untere Grenze der Wahrscheinlichkeitsbänder liegt mehr oder weniger bei einer konstanten Differenz zu dem modellierten Mittelwert mit -13, -16 und -6% für das 90%ige Konfidenzintervall für die Modelle MAED-2 bzw. BREHOMES und CDEM. Das Gleiche gilt für die oberen Grenzen der Wahrscheinlichkeitsbänder, welche bei +14%, +16% und +6% für das 90%ige Konfidenzintervall für die jeweiligen Modelle MAED-2, BREHOMES und CDEM liegen.

CDEM und BREHOMES verwenden den gleichen Kernrechner (BREDEM), daher wurden ähnliche Wahrscheinlichkeitsbänder erwartet. Trotzdem ist das Wahrscheinlichkeitsband des CDEM-Modells schmaler als dasjenige des BREHOMES Modells. Der Grund für diesen Unterschied liegt in der verschiedenen Unterteilung des Wohngebäudebestandes, um den Endenergiebedarf zu prognostizieren. Während die Berechnungen mit CDEM für jeden Haus-Archetyp durchgeführt werden, wird in BREHOMES nur ein einzelner repräsentativer Haus-Archetyp verwendet. Dies impliziert, dass ein höherer Detaillierungsgrad der Modellierung niedrigere Unsicherheiten bei den Ausgangsparametern bewirkt.

Allgemein betrachtet zeigen die Ergebnisse der MCA, dass die kumulative Unsicherheit in den bestehenden Modellen groß ist und die Wahrscheinlichkeitsbänder für ein 90%iges Konfidenzintervall um zwischen -19% und +25% vom modellierten Mittelwert abweichen. Hierbei wurden die Ergebnisse von BREHOMES-A aus den bereits in Unterabschnitt 4.2.2 genannten Gründen nicht betrachtet, da die kumulative Unsicherheit mit deren Einbezug deutlich größer ausfällt (zwischen -24% und +54%). Die Ergebnisse für die absoluten Unterschiede der Wahrscheinlichkeitsbänder für den Endenergiebedarf im Vergleich zum modellierten Mittelwert können jedoch wegen der Unsicherheit der Eingangsparameter erheblich schwanken. Tab. 4.7 zeigt, dass diese Schwankungen im Durchschnitt für alle untersuchten Modelle bei  $\pm 101 TWh/a$  für das 90%ige Intervall liegen.

**Tab. 4.7:** Absolute Differenz des errechneten 90%igen Konfidenzintervalls im Vergleich zum modellierten Mittelwert für den Endenergiebedarf im deutschen Wohnungssektor

Jahr	Absolute Differenz, unteres 90%iges Konfidenzintervall (TWh/a)			Absolute Differenz, oberes 90%iges Konfidenzintervall (TWh/a)		
	2001	2005	2010	2001	2005	2010
BSM	-40	-55	-74	80	109	148
LEAP	-27	-70	-179	25	48	93
REM <sup>1</sup>	-130	-117	-105	82	64	70
FfE-Gebäudemodell	-139	-127	-107	93	64	68
MAED-2	-90	-90	-107	90	98	118
BREHOMES-A <sup>2</sup>	-104	-144	-203	109	198	450
BREHOMES-B <sup>3</sup>	-105	-110	-116	107	111	117
CDEM	-42	-43	-46	39	40	42

<sup>1</sup> Die Ergebnisse für REM berücksichtigen den Kalibrierungskoeffizienten K nicht, da die Ergebnisse des modellierten Endenergiebedarfs ansonsten identisch zu den Daten des BMWi wären (s. Anhang D-3).

<sup>2</sup> Bestimmung des Endenergiebedarfs mit den originalen BREDEM-Algorithmen für die Anzahl der Wohnungen.

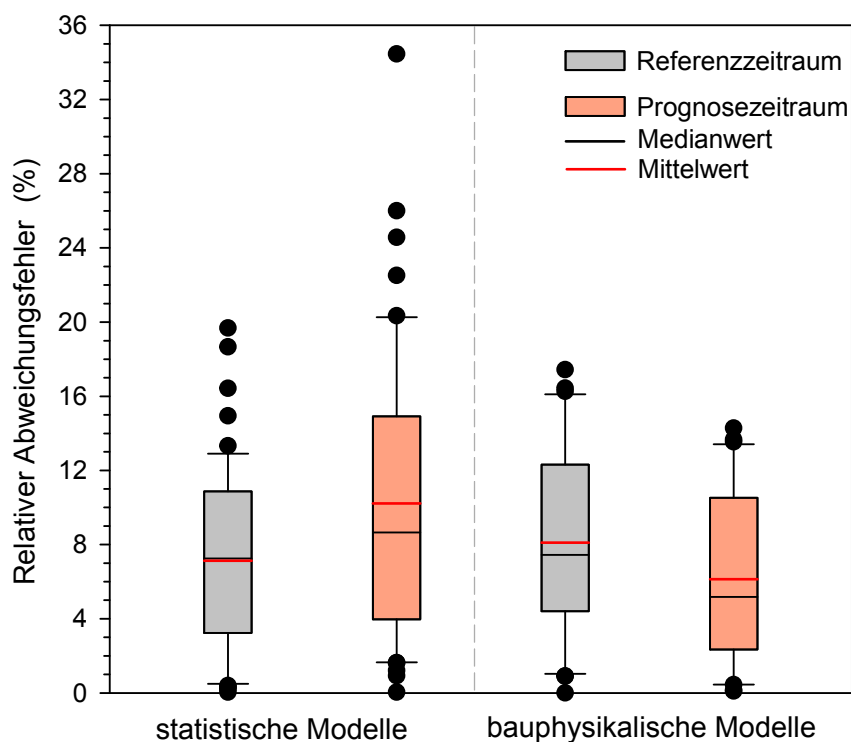
<sup>3</sup> Bestimmung des Endenergiebedarfs unter Berücksichtigung von Anpassungen der originalen Algorithmen.

### 4.3 Schlussfolgerungen für die Optimierung von Prognosemodellen

In diesem Kapitel wurden die Übertragbarkeit und Genauigkeit von zwölf bestehenden Prognosemodellen (MAED-2, FfE-Gebäudemodell, CDEM, REM, CREEM, ECCABS, REEPS, BREHOMES, LEAP, BSM, DECM und CHM) durch objektive Analyseparameter und Bewertungskriterien untersucht. Weiterhin wurden mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse und einer Monte-Carlo-Simulation der Einflussgrad der Eingangsparameter bestimmt sowie die Unsicherheiten der Modellergebnisse quantifiziert.

Bei der Untersuchung der Übertragbarkeit der Modelle wurde herausgefunden, dass alle statistischen Modelle übertragbar sind, was nicht auf alle bauphysikalischen Modelle zutrifft. Die Hauptgründe hierfür bestehen darin, dass die verwendeten Kernrechner (HOT2000, SAP-2005 und SAP-2009) die Eingabe von Klimadaten anderer Länder zum Teil nicht erlauben sowie dass die für die Modellierung benötigten Daten nicht verfügbar sind. Die Ergebnisse der Untersuchung der Übertragbarkeit der bestehenden Modelle dienen zur Bestimmung, welche Modelle in der Lage sind, den Endenergiebedarf eines beliebigen Landes zu bestimmen, auch wenn es ursprünglich nicht für dieses Land entwickelt worden ist. Außerdem wird gezeigt, welche Anpassungen für jedes Modell gegebenenfalls notwendig sind. Die Übertragbarkeit von Modellen hat hierbei insbesondere den Vorteil, dass die Notwendigkeit, ein neues Modell für jedes untersuchte Land zu entwickeln, entfällt.

Die Ergebnisse der Überprüfung der Genauigkeit der übertragbaren Modelle zeigen, dass es keine bedeutenden Unterschiede zwischen den Ergebnissen der bauphysikalischen und statistischen Modelle gibt. Dies wird in Abb. 4.16 verdeutlicht, welche die Konfidenzintervalle der relativen Abweichungsfehler der acht übertragbaren Modelle nach Modellansatz (bauphysikalisch/ statistisch) und Untersuchungszeitraum (Referenz- Prognosezeitraum) zeigt. Hierbei ist zu sehen, dass die bauphysikalischen und statistischen Modelle im Referenzzeitraum sehr ähnliche relative Abweichungsfehler bzw. Genauigkeit aufweisen. Im Prognosezeitraum ist eine leichte Reduktion der Abweichungsfehler bei den bauphysikalischen Modellen zu beobachten. Allerdings ist allgemein zu beachten, dass, obwohl die meisten Modelle die Tendenz der Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Referenzzeitraum bestimmen konnten, keines der analysierten Modelle in der Lage war, diese für den Prognosezeitraum anzugeben (s. Tab. 4.5).



**Abb. 4.16:** Konfidenzintervalle der relativen Abweichungsfehler der acht übertragbaren Modelle (REM, BSM, MAED-2, FfE-Gebäudemodell, LEAP-B, ECCABS, CDEM, BREHOMES-B), aufgeteilt in bauphysikalische und statistische Modelle (s. Table 4-5 für die individuelle Ergebnisse der Modelle)



Aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse wurde der Einflussgrad der Eingangsparameter bestimmt. Hierbei wurde festgestellt, dass am Fallbeispiel Deutschland die einflussreichsten Parameter für den Endenergiebedarf die Anzahl der Gebäude/Wohnungen, die Personen pro Wohnung sowie die Innen- und die Außentemperatur sind. Diese Eingangsparameter sind jedoch nicht durch Energieeinsparmaßnahmen beeinflussbar. Eingangsparameter, die einen bedeutenden Einfluss auf den Endenergiebedarf haben und ebenfalls durch Energieeinsparmaßnahmen direkt beeinflusst werden können sind der Nutzungsgrad der im Gebäude verwendeten Anlagen/Geräte oder die Dämmung der thermischen Gebäudehülle. Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse wurde außerdem festgestellt, dass der Einflussgrad der einzelnen Eingangsparameter jeweils vom Detaillierungsgrad des Modells (s. Tab. 4.6) abhängt. Die Ergebnisse der Bestimmung des Einflussgrads der Eingangsparameter können nicht nur zur Entwicklung von wirksamen Energieeinsparmaßnahmen verwendet werden, sondern auch, um festzustellen, welche Eingangsparameter zur Erstellung eines optimierten Prognosemodells unbedingt notwendig sind.

Die Ergebnisse der Analysen zur statistischen Unsicherheit zeigen, dass die Unsicherheiten der Ergebnisse einer Modellierung in direkter Korrelation zum Detaillierungsgrad des Modells stehen. Modelle mit einem niedrigen Detaillierungsgrad liefern Ergebnisse mit größeren Unsicherheiten als Modelle mit höherem Detaillierungsgrad. Ebenfalls stehen die Formen der Wahrscheinlichkeitsbänder in direkter Verbindung mit dem Detaillierungsgrad der Modelle. Modelle mit einem geringeren Detaillierungsgrad besitzen Wahrscheinlichkeitsbänder, die im Laufe der Zeit eine Trapezform annehmen. Dagegen weisen die Wahrscheinlichkeitsbänder der Modelle mit höherem Detaillierungsgrad eine parallele Form mit relativ konstanten Werten für die oberen und unteren Grenzen der Wahrscheinlichkeitsbänder auf. Die Ergebnisse der in dieser Arbeit durchgeführten Unsicherheitsanalyse leisten einen Beitrag dazu, die bestehende Lücke in der Modelltheorie von Prognosemodellen zur Quantifizierung der Unsicherheiten der Ergebnisse der Prognosemodelle zu schließen. Dies wird von einigen Autoren als notwendige Verbesserung in der Modellentwicklung betrachtet [28, 59-61].

Außerdem ist es möglich, auf der Grundlage der in diesem Kapitel gewonnen Erkenntnisse ein optimiertes Prognosemodell zu entwickeln, welches die Bestimmung des zukünftigen Endenergiebedarfs im Wohnungssektor eines beliebigen Landes ermöglicht. Dies wird im folgenden Kapitel beschrieben.



## **5 Ansatz für ein optimiertes Modell zur Prognose des Energiebedarfs im Wohnungssektor**

Dieser Teil der Arbeit widmet sich der Weiterentwicklung bestehender Modelle in ein übertragbares Prognosemodell auf Grundlage der Ergebnisse aus der Überprüfung der in Kapitel 4 beschriebenen Modelle. Neben der Übertragbarkeit sollte das neue Modell eine verbesserte Genauigkeit unter Berücksichtigung der vorgenommenen Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen besitzen. Das resultierende weiterentwickelte Modell wird im Folgenden am Beispiel des deutschen Wohnungssektors erklärt und als TREM (Transferable Residential Energy Model) bezeichnet. Die Genauigkeit und Übertragbarkeit des TREM-Modells wird anschließend in Kapitel 6 anhand der Daten von drei verschiedenen Ländern (Deutschland, Chile, Vereinigtes Königreich) überprüft.

### **5.1 Weiterentwicklung bestehender Modelle in ein übertragbares Prognosemodell**

Alle in Kapitel 4 überprüften statistischen Modelle, sind grundsätzlich auf andere Länder übertragbar und besitzen zudem eine hohe Genauigkeit zur Bestimmung des Endenergieverbrauchs im Referenzzeitraum (1990-2000). Daher ist im Hinblick auf die Entwicklung eines übertragbaren Modells die Nutzung eines statistischen „Bottom-Up“-Ansatzes sinnvoll. Die Modellierung des Endenergiebedarfs im Prognosezeitraum (2001-2010) allein mit statistischen „Bottom-Up“-Modellen zeigt jedoch gegenüber dem tatsächlichen Endenergieverbrauch Diskrepanzen auf. Dies liegt daran, dass diese Modelle, wie in Abschnitt 3.1 verdeutlicht wurde, die einflussreichsten Faktoren, die eine Verringerung des Endenergieverbrauchs bewirken können, nicht immer direkt in Betracht ziehen; z.B. die Entwicklung des Nutzungsgrades der Anlagen/Geräte oder die Reduktion des Transmissionswärmeverlustes durch die Verbesserung der Wärmedämmmaterialien. Aus diesem Grund wird für das TREM-Modell zwar ein Bottom-Up-statistischer-Ansatz verwendet, zusätzlich werden aber auch Eingangsparameter wie Innentemperatur, Außentemperatur, Transmissionswärmeverlust und Nutzungsgrad der Anlagen, welche typisch für bauphysikalische Modelle sind, integriert. Das TREM-Modell besteht aus zwei Modulen, ein Modul zur Unterteilung und Bestimmung des Gebäudebestandes und ein weiteres zur Bestimmung des spezifischen Endenergiebedarfs nach Haus-Archetyp und Nutzungsbereich (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung). Dieser Modellierungsansatz verwendet dieselbe Unterteilungsmethode, welche von allen hier analysierten Modellen (s. Kapitel 3)

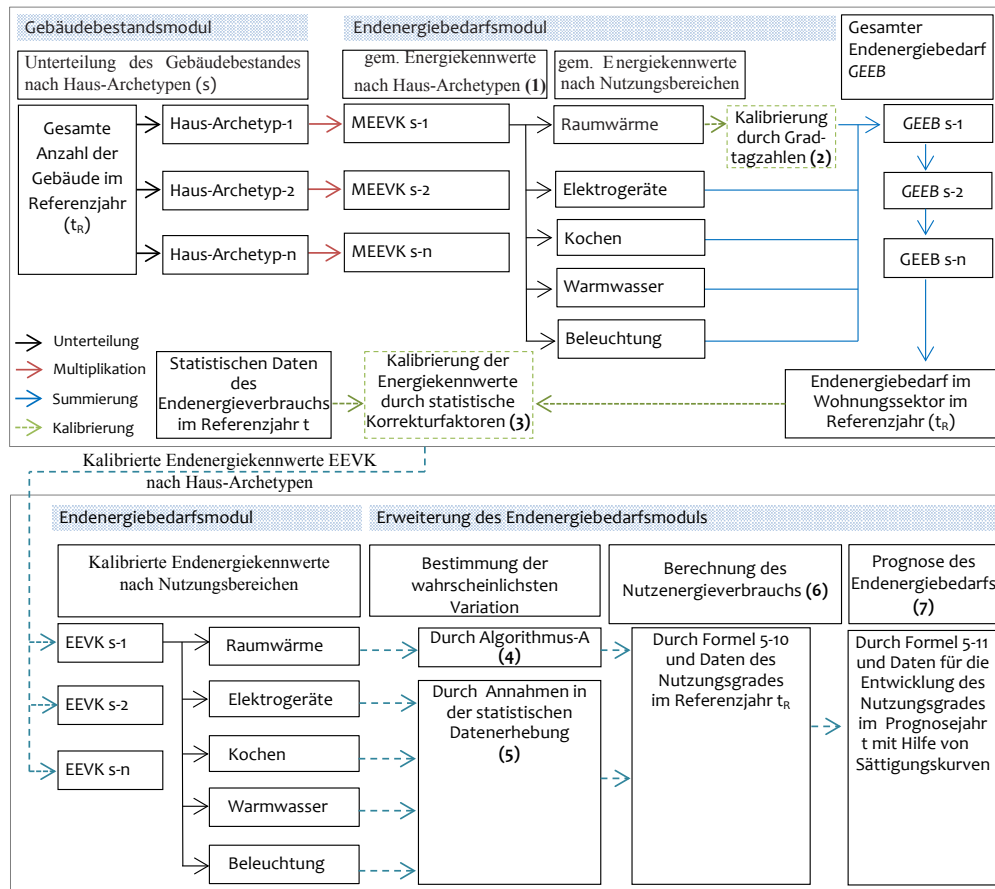
verwendet wurde. Im Gebäudebestandsmodul des TREM-Modells wird die Gesamtanzahl der Gebäude in repräsentative Haus-Archetypen unterteilt. Die Verwendung von repräsentativen Haus-Archetypen zur Reduktion des Aufwands im Datenerhebungs- und Modellierungsprozess wurde von fast allen Autoren der bestehenden Modelle empfohlen [15, 16, 19-21, 62]. Im Endenergiebedarfsmodul werden jedem Haus-Archetyp die durchschnittlich gemessenen Endenergieverbrauchskennwerte (MEEVK) entsprechend den Nutzungsbereichen zugewiesen. Die gemessenen Endenergieverbrauchskennwerte werden aus statistischen Daten der dazugehörigen Länder entnommen (s. Unterabschnitt 5.1.2 und Tab. 6.1).

Abb. 5.1 zeigt die Struktur des TREM-Modells zur Berechnung des Endenergiebedarfs im vom Nutzer festgelegten Referenzjahr<sup>7</sup>. Hierbei wird der Endenergiebedarf, unterteilt nach Haus-Archetypen und Nutzungsbereichen, durch die Multiplikation der Anzahl der Gebäude mit den dazugehörigen durchschnittlich gemessenen Endenergieverbrauchskennwerten erhalten. Die Summe des Endenergiebedarfs aller Haus-Archetypen wiederum repräsentiert den gesamten Endenergiebedarf im Wohnungssektor eines Landes. Dieser Modellierungsansatz ist typisch für die statistischen Modelle und wurde hier verwendet, da dadurch die Datenerhebung für die Modellierung sowie die Übertragbarkeit des Modells erleichtert wird (s. Kapitel 3 und Kapitel 4).

Die verwendeten gemessenen Endenergieverbrauchskennwerte für Raumwärme im Referenzjahr werden mit Hilfe von Gradtagzahlen kalibriert (s. Modellierungsschritt 2 in Unterabschnitt 5.1.2), da die klimatischen Bedingungen, wie die Außentemperatur des Jahres, in dem die Daten des Endenergieverbrauchs erhoben wurden, in der Regel von dem gebildeten Mittelwert des Referenzjahres abweichen. Zur Kalibrierung des Modells wird beispielhaft das Jahr 2000 als Referenzjahr für den deutschen Wohnungssektor betrachtet. Nach der Kalibrierung der gemessenen Endenergieverbrauchskennwerte für die Raumwärme wird eine erste Bestimmung des Endenergiebedarfs im Referenzjahr mit dem TREM-Modell durchgeführt. Bei großem Unterschied zwischen den Ergebnissen des TREM-Modells und den „tatsächlichen“ statistischen Daten des Endenergieverbrauchs im Referenzjahr wird eine zweite Kalibrierung der gemessenen Endenergieverbrauchskennwerte vorgenommen (s. Modellierungsschritt 3 in Unterabschnitt 5.1.2). Hierbei folgt der Modellierungsansatz den Methoden, die bereits im REM-Modell [15] und dem FfE-Gebäudemodell [16] zur Kalibrierung der Endenergieverbrauchskennwerte verwendet wurden.

---

<sup>7</sup> Das Referenzjahr ist das erste Jahr ( $t_R$ ) zur Berechnung des Endenergiebedarfs. In ihm werden tatsächliche Daten als Eingangsparameter verwendet und die Energiekennwerte mit Hilfe von statistischen Daten des Endenergieverbrauchs aus nationalen Statistiken kalibriert. Im Fallbeispiel Deutschland stammen die statistischen Daten des Endenergieverbrauchs vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.



**Abb. 5.1:** Struktur des TREM-Modells zur Bestimmung des Endenergieverbrauchs im Referenzjahr  $t_R$  und Erweiterung des Endenergiebedarfsmoduls zur Bestimmung der wahrscheinlichsten Variation der Endenergiekennwerte und Prognose des Endenergiebedarfs im Prognosejahr  $t$ . (1) bis (7): Modellierungsschritte

Nach der Kalibrierung der gemessenen Endenergieverbrauchskennwerte wird eine Prognose des Endenergiebedarfs für die zukünftigen Jahren erstellt. Zur Prognose des zukünftigen Endenergiebedarfs und den gleichzeitig möglichen Variationen, welche diese Prognose haben könnte, wird eine neue Philosophie in der Modellierung betrachtet: Die Bestimmung der wahrscheinlichsten Schwankungen des Endenergiebedarfs mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen (s. Modellierungsschritt 4, 5 und 6 in Unterabschnitt 5.1.2). Hierzu werden in beiden Modulen (Gebäudebestand und Endenergiebedarf) „Wahrscheinlichkeitsfaktoren“ aus Wahrscheinlichkeitsverteilungen<sup>8</sup> integriert. Ein Wahrscheinlichkeitsfaktor ist hierbei ein wahrscheinlicher Wert, den

<sup>8</sup> Als eine Wahrscheinlichkeitsverteilung wird hier als eine statistisch bekannte Funktion (in diesem Fall eine Normalverteilung, Weibull-Verteilung, Beta-Verteilung oder Dreiecksverteilung) verstanden, welche die möglichen Variationen eines Wahrscheinlichkeitsfaktors beschreiben kann.

die Eingangsparameter annehmen können, um eine mögliche Variation abzubilden. Zur Entwicklung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen wird dasselbe Verfahren, welches in Unterabschnitt 4.1.4 (Unsicherheit) dargestellt wurde, verwendet. Zur Überprüfung der Genauigkeit und Übertragbarkeit des TREM-Modells werden dieselben Kriterien verwendet, welche in Unterabschnitt 4.1.1 (Genauigkeit) und Unterabschnitt 4.1.2 (Übertragbarkeit) dargestellt wurden.

### 5.1.1 Gebäudebestandsmodul

Im Gebäudebestandsmodul wird der gesamte Gebäudebestand in repräsentative Haus-Archetypen unterteilt. Jeder dieser Haus-Archetypen repräsentiert eine bestimmte Anzahl an Gebäuden. Ein Haus-Archetyp wird im TREM-Modell nach Gebäudetyp (Einfamilienhaus, Zweifamilienhaus, oder Mehrfamilienhaus), Altersgruppen, und Klimaregionen bestimmt. Der Gebäudebestand eines Landes wird mit Hilfe der Gleichung 5.1 ermittelt. Die Gleichung 5.1 wurde auf Basis der Gleichung 3.7 von McKenna et al. [27] (siehe Kapitel 3), entwickelt. Dabei wurden jedoch zwei Änderungen vorgenommen.

Die erste Änderung bezieht sich auf die Unterteilung von Gebieten eines Landes. McKenna et al. [27] haben Deutschland in zwei „Regionen“ (Ost und West) unterteilt. Im TREM-Modell hingegen wird die Unterteilung der Gebiete eines Landes bezüglich der dort vorhandenen Klimazonen durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass es in der Regel genügend Informationen über die Unterteilung eines Landes in Klimazonen gibt (s. zum Beispiel [3, 18, 19, 25, 131]). Daher werden bestehende Informationen zu Klimazonen verwendet, um das gesamte Gebiet eines Landes entsprechend der vorherrschenden klimatischen Bedingungen zu unterteilen. Hiermit folgt der Modellierungsansatz den Methoden, die bereits in den Modellen REEPS [3] und CREEM [18] zur Anwendung kommen.

Die zweite Änderung betrachtet die Inklusion der sanierten Gebäude. Hierbei wird vorausgesetzt, dass die sanierten Gebäude die gleichen energetischen Anforderungen wie die Neubauten erfüllen müssen und daher den Energiebedarf eines Neubaus aufweisen werden. Es muss angemerkt werden, dass im deutschen Wohnungssektor normalerweise die Anforderungen an Sanierungen unter den Neubaustandards liegen. Bisher gibt es aber keine repräsentative Studie, welche die möglichen Unterschiede zwischen den Energieverbrauchskennwerten von sanierten Gebäuden und Neubauten quantifiziert. Daher ist eine Erweiterung des TREM-Modells durch einen Korrekturfaktor zur Differenzierung der Energieverbrauchskennwerte von sanierten Gebäuden und Neubauten zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit nicht möglich.

$$\begin{aligned}
 GB_{tot,s,k}(t) = & \sum_a (GB_{a,s,k,t_R} - A_{meb,a,s,k}(t) - A_{oeb,a,s,k}(t)) + \\
 & + \sum_{2010}^z NB_{df,s,k}(t) + \sum_{2010}^z NB_{eb,s,k}(t) + SG_{a,s,k}(t) \\
 & \forall z \in \{2010, \dots, 2050\}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

mit:

- $GB_{tot,s,k}(t)$  – gesamte Anzahl der Gebäude im Jahr  $t$
- $GB_{a,s,k,t_R}$  – Anzahl der Gebäude im Referenzjahr  $t_R$
- $A_{meb,a,s,k}(t)$  – Abriss mit Ersatzbau im Jahr  $t$
- $A_{oeb,a,s,k}(t)$  – Abriss ohne Ersatzbau im Jahr  $t$
- $NB_{df,s,k}(t)$  – Neubauten auf Basis demografischer Faktoren
- $NB_{eb,s,k}(t)$  – Neubauten Ersatzbau
- $SG_{a,s,k}(t)$  – Sanierete Gebäude im Jahr  $t$  nach Baujahr,  
Haus-Archetyp und Klimazone
- $a$  – Baujahr
- $s$  – Haus-Archetyp
- $k$  – Klimazone

Zur Prognose des zukünftigen Gebäudebestandes werden Wahrscheinlichkeitsfaktoren verwendet. Diese Wahrscheinlichkeitsfaktoren werden zur Bestimmung der Anzahl von: Gebäudeabrissen ohne Ersatzbau (Gleichung 5.2), Neubauten auf Basis demografischer Faktoren (Gleichung 5.3), Ersatzbauten (Gleichung 5.4) und Sanierungen (Gleichung 5.5) verwendet.

$$A_{oeb,s,k}(t) = GB_{a,s,k}(t) \cdot WfA_{oeb} \tag{5.2}$$

$$NB_{df,s,k}(t) = GB_{a,s,k}(t) \cdot WfNB_{df} \tag{5.3}$$

$$NB_{eb,s,k}(t) = GB_{a,s,k}(t) \cdot WfNB_{eb} \quad (5.4)$$

$$SG_{s,k}(t) = GB_{a,s,k}(t) \cdot WfSG \quad (5.5)$$

mit:

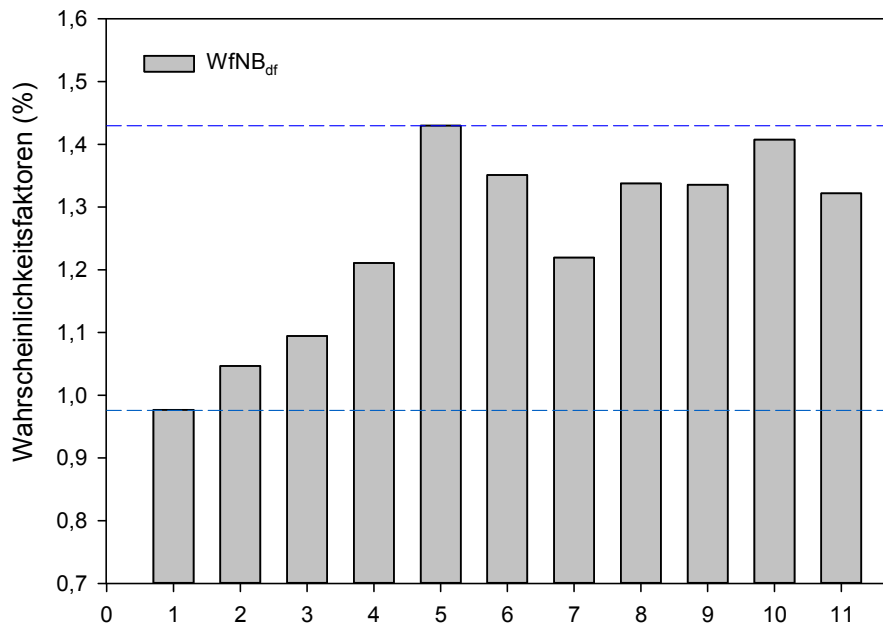
- $WfA_{oeb}$  – Wahrscheinlichkeitsfaktoren für den Abriss von Gebäuden  
ohne Ersatzbau
- $WfNB_{df}$  – Wahrscheinlichkeitsfaktoren für Neubauten auf Basis demografischer  
Faktoren
- $WfNB_{eb}$  – Wahrscheinlichkeitsfaktoren für Ersatzbauten
- $WfSG$  – Wahrscheinlichkeitsfaktoren für Sanierungen

Werte für die Wahrscheinlichkeitsfaktoren für den deutschen Wohngebäudebestand wurden aus statistischen Daten [23, 48, 149, 216, 243, 247, 256, 257] des Referenzzeitraums (1990–2000) abgeleitet. Dies bedeutet, dass für jeden Eingangsparameter (Gebäudeabriss ohne Ersatzbau, Neubauten auf Basis demografischer Faktoren, Ersatzbauten und Sanierungen) insgesamt elf Werte, also je ein Wert pro Jahr, betrachtet wurden. Da diese geringe Anzahl an Werten jedoch noch nicht genügend Informationen liefert, um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zu entwickeln, wurden die elf Einzelwerte als Wahrscheinlichkeitsfaktoren verwendet (s. Beispiel in Abb. 5.2 und Abb. 5.3). Hierbei entsteht ein Bereich von individuellen Werten, welcher durch die maximalen und minimalen Werte des jeweiligen Eingangsparameters definiert wird.

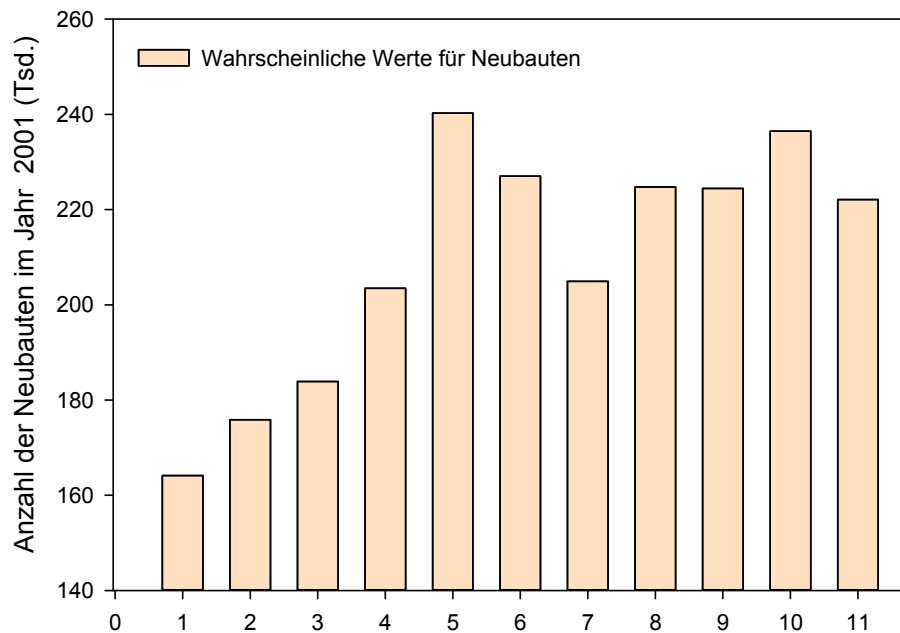
Für Neubauten auf Basis demografischer Faktoren gab es im Referenzzeitraum (1990–2000) zum Beispiel elf Wachstumsraten zwischen 0,98% und 1,43% vom Gesamtgebäudebestand des Vorjahres (Abb. 5.2). Es wird angenommen, dass jeder der elf Werte des Referenzzeitraums zufällig mit der gleichen Wahrscheinlichkeit in der Simulation verwendet werden kann, um die Anzahl der jährlich neu gebauten Gebäude im Prognosezeitraum zu bestimmen. Abb. 5.3 zeigt, dass es auf Basis der Anzahl der Gebäude (16.802.259) im letzten Jahr des Referenzzeitraums (2000) für das erste Jahr im Prognosezeitraum (2001) elf wahrscheinliche Werte für die Entwicklung der Anzahl der Neubauten gibt (Abb. 5.3).

Abb. 5.4 zeigt die Wahrscheinlichkeitsfaktoren der Eingangsparameter „Gebäudeabriss ohne Ersatzbau  $WfA_{oeb}$ “ und „Sanierung  $WfSG$ “, die im Modell auf die gleiche Weise verwendet werden wie oben für die Bestimmung der Anzahl der Neubauten beschrieben

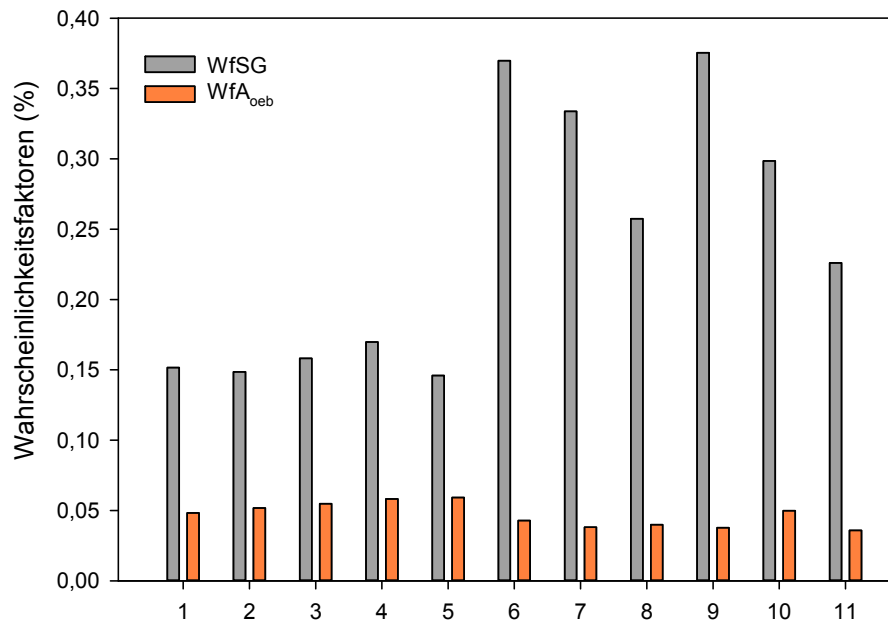




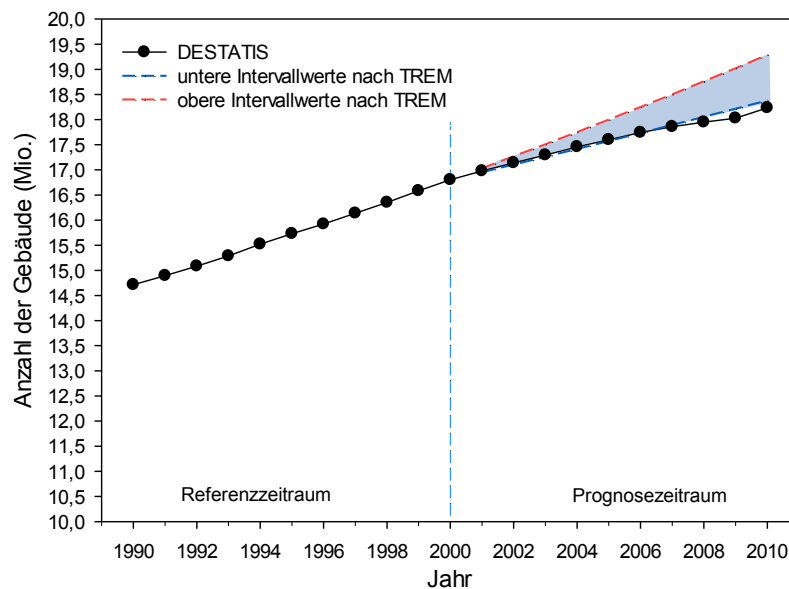
**Abb. 5.2:** Wahrscheinlichkeitsfaktoren für Neubauten in Deutschland, Datenquelle: DESTATIS [23, 243, 257]



**Abb. 5.3:** Ergebnisse der elf wahrscheinlichsten Werte für die Entwicklung der Anzahl der Neubauten in Deutschland im Jahr 2001, basierend auf den Wahrscheinlichkeitsfaktoren für Neubauten (Abb. 5.2) und Gleichung 5.3



**Abb. 5.4:** Wahrscheinlichkeitsfaktoren für Gebäudeabriss ohne Ersatzbau ( $WfA_{oeb}$ ) und Sanierung ( $WfSG$ ), Datenquellen: [23, 243, 257].



**Abb. 5.5:** Entwicklung der Anzahl der Gebäude in Deutschland entsprechend der Simulation mit TREM

wird. Als Wahrscheinlichkeitsfaktoren für die Ersatzbauten  $WfNB_{eb}$  wurden die Werte 0,02 und 0,03 verwendet, auf Basis der Studie von McKenna et al. [27]. Abb. 5.5 zeigt die Ergebnisse der Simulation mit TREM unter Verwendung der Gleichung 5.1 und den obengenannten Wahrscheinlichkeitsfaktoren. Die Ergebnisse der Simulation zeigen einen Bereich, in dem sich, entsprechend des vorgenommenen Modellierungsansatzes, die mögliche Anzahl der Wohngebäude in Deutschland befinden kann. In Abb. 5.5 ist auch zu erkennen, dass sich die tatsächliche Anzahl der Gebäude nach DESTATIS bis 2007 im Bereich der Prognose befindet. Die prognostizierte Anzahl der Gebäude zeigt insgesamt eine deutliche Zunahme, während die tatsächliche Anzahl der Gebäude ab 2007 jedoch eine Stagnation aufweist. Dies bewirkt einen Unterschied in den letzten 3 Jahren der Prognose. Dieser Unterschied ist jedoch nicht höher als 3% im Vergleich zum Mittelwert der prognostizierten Werte für die Anzahl der Gebäude.

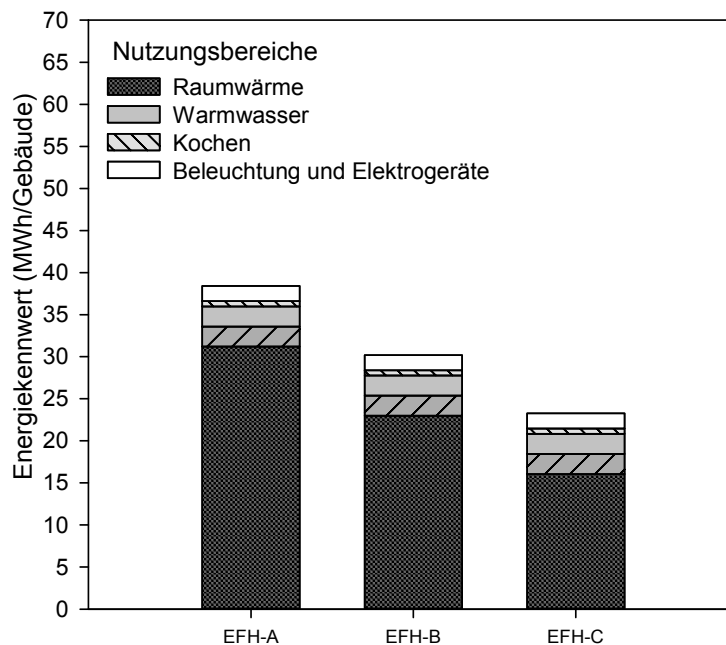
### 5.1.2 Endenergiebedarfsmodul

Im Endenergiebedarfsmodul werden jedem Haus-Archetyp gemessene Kennwerte für den Energieverbrauch (MEEVK) zugewiesen. Die Endenergieverbrauchskennwerte werden nach Nutzungsbereichen (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung) unterteilt. Außerdem werden in diesem Modul Wahrscheinlichkeitsfaktoren zur Bestimmung der wahrscheinlichsten Variationen der Endenergieverbrauchskennwerte auf Grundlage des Einflusses des Klimas (Innen- und Außentemperatur), der Verbesserung der Wärmedämmung der Gebäude (geringerer Transmissionswärmeverlust) sowie der Verbesserung des Nutzungsgrades der Anlagen/Geräte verwendet. Diese Eingangsparameter werden im Modell berücksichtigt, weil sie laut Sensitivitätsanalyse zusammen mit der Anzahl der Gebäude/Wohnungen die einflussreichsten Parameter darstellen (Unterabschnitt 4.2.3). Weiterhin üben die jährlichen Klimaschwankungen (Abb. 2.14) sowie die progressive Entwicklung des Nutzungsgrades der Anlagen/Geräte (Abschnitt 2.3) aber auch die Verbesserung der Wärmedämmung der Gebäude einen großen Einfluss auf den Endenergiebedarf aus.

Das gesamte Verfahren zur Bestimmung des Endenergiebedarfs nach Haus-Archetyp erfolgt in sieben Schritten:

### **Modellierungsschritt 1: Zuweisung spezifischer gemessener Endenergieverbrauchskennwerte (MEEVK) nach Haus-Archetypen**

Im Endenergiebedarfsmodul wird jedem Haus-Archetyp entsprechend der Unterteilung im „Gebäudebestandsmodul“ ein spezifischer gemessener Endenergieverbrauchskennwert (MEEVK) nach Nutzungsbereichen zugewiesen (Abb. 5.6). Abb. 5.6 zeigt beispielsweise Endenergieverbrauchskennwerte nach Nutzungsbereichen für drei Haus-Archetypen in Deutschland (Einfamilienhäuser entsprechend Anhang C, Abschnitt C.5). Die Endenergieverbrauchskennwerte, die aus den Arbeiten von Loga et al. [41] und dem Öko-Institut und FhG-ISI [147] abgeleitet wurden, zeigen einen ähnlichen Endenergieverbrauch für alle Haus-Archetypen in allen Nutzungsbereichen, außer für Raumwärme. Im Bereich Raumwärme sind deutliche Unterschiede des spezifischen Endenergieverbrauchs zu sehen. Hier verbraucht beispielsweise ein vor 1861 gebautes Einfamilienhaus (EFH-A) 30% mehr Energie als ein zwischen 1861–1919 gebautes Haus (EFH-B) und mehr als 70% als ein zwischen 1919–1949 gebautes Haus (EFH-C). Die Erklärung dafür liegt im Wesentlichen in der unterschiedlichen Konstruktionsweise, den Bauteilflächen (z.B. Fenstergrößen) und den Transmissionswärmeverlusten der Gebäudehüllfläche nach Bauepoche, welche deutlich den Heizwärmebedarf beeinflussen [17, 41] (s. auch Abschnitt 2.3).



**Abb. 5.6:** Energiekennwerte des Endenergieverbrauchs nach Nutzungsbereichen für drei ausgewählte Haus-Archetypen in Deutschland, Datenquellen: [17, 152]

### ***Modellierungsschritt 2: Kalibrierung der gemessenen Endenergieverbrauchskennwerte für Raumwärme durch Gradtagzahlen***

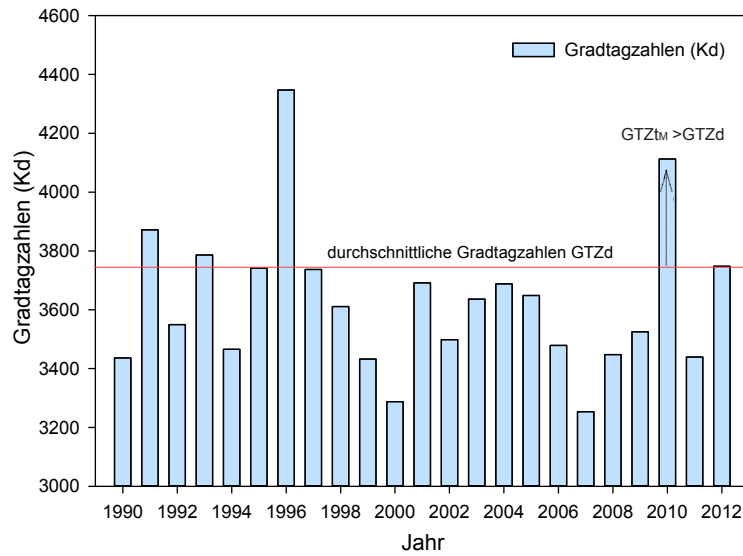
Nach der Zuweisung von Endenergiekennwerten entsprechend des Haus-Archetyps wird zusätzlich eine Korrektur des Endenergieverbrauchskennwertes für Raumwärme vorgenommen, da der Endenergieverbrauch hierfür abhängig von der Variation der Außentemperatur ist: in kälteren Jahren ist der Endenergieverbrauch höher als in wärmeren Jahren. Daher kann die Verwendung gemessener Endenergieverbrauchskennwerte (MEEVK) eines bestimmten Messjahres<sup>9</sup> zu Fehlern in einer Prognose führen, insbesondere dann, wenn die Messungen in einem besonders kalten oder warmen Jahr durchgeführt wurden. Zur Vermeidung dieses Fehlers wird im TREM-Modell ein ähnlicher Ansatz wie bei der AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen) [147, 229] verfolgt, das heißt, es wird ein Korrekturfaktor für die jährlichen Gradtagzahlen verwendet.

Der Korrekturfaktor für die jährlichen Gradtagzahlen ( $KFt$ ) wird gebildet durch das Verhältnis zwischen der Gradtagzahl im langjährigen Durchschnitt  $GTZ_d$  zur effektiven Gradtagzahl im Messjahr  $GTZ_{t_M}$  der Messungen der Endenergieverbrauchskennwerte:  $GTZ_d/GTZ_{t_M}$ . Wenn, also die entsprechende Gradtagzahl im Messjahr gleich dem langjährigen Durchschnittswert ist, d.h.  $KFt = 1$ , dann werden die gemessenen Endenergieverbrauchskennwerte für Raumwärme gleich bleiben. Bei Korrekturfaktoren  $KFt \neq 1$  werden die gemessenen Endenergieverbrauchskennwerte in direkter Proportion zu den Korrekturfaktoren verändert.

In Deutschland wurden im Jahr 2010 Messungen des Endenergieverbrauchs für verschiedene Haus-Archetypen im Rahmen des Forschungsprojekts „Datenbasis Gebäudebestand“ [41] durchgeführt. Die repräsentative Stichprobenerhebung dieses Projekts umfasst 7.364 Wohngebäudedatensätze.

Abb. 5.7 zeigt, dass die jährliche Gradtagzahl im Jahr 2010 mit  $GTZ_{t_M} = 4113Kd$  wesentlich höher war als der langfristige Mittelwert der Gradtagzahlen von  $GTZ_d = 3743Kd$ . Somit ergibt sich der Korrekturfaktor zu  $KFt = 0,91$ . Aus diesem Grund werden für alle Haus-Archetypen aus der obengenannten Studie [41] die gemessenen Endenergieverbrauchskennwerte für Raumwärme mit diesem Korrekturfaktor multipliziert, um einen neuen, angepassten „Endenergiekennwert EEVK“ zu erhalten.

<sup>9</sup>Als Messjahr ( $t_M$ ) wird hier das Jahr verstanden, in dem der Endenergieverbrauch der Haus-Archetypen gemessen wurde. Das Messjahr kann vom Referenzjahr abweichen.



**Abb. 5.7:** Entwicklung der zur Berechnung des Korrekturfaktors für die Raumwärme herangezogenen Gradtagzahlen (GTZ) in Deutschland von 1990–2012, Datenquellen: [147, 153]

### *Modellierungsschritt 3: Kalibrierung von gemessenen Endenergieverbrauchskennwerten durch statistische Korrekturfaktoren*

Im Falle dessen, dass es einen bedeutenden Unterschied zwischen den Ergebnissen des TREM-Modells für den Endenergiebedarf und dem statistischen „tatsächlichen“ Endenergieverbrauch im Referenzjahr gibt, wird wie beim REM-Modell [15] und dem FfE-Gebäudemodell [16] ein zweiter Korrekturfaktor verwendet. Hierzu erfolgt zuerst eine Summierung des mit dem TREM-Modell ermittelten gesamten Endenergiebedarfs für alle Haus-Archotypen  $\sum GEEB_{Gs}$ . Danach wird mit Hilfe des „tatsächlichen“ Gesamtendenergieverbrauchs  $GEEV$  aus statistischen Daten des dazugehörigen Landes ein Korrekturfaktor gebildet. Dieser besteht aus dem Quotienten der Summe der statistischen und der berechneten Daten:  $K_r = \frac{\sum GEEB_{Gs}}{GEEV}$ . Im letzten Schritt wird der gemessene „Endenergieverbrauchskennwert“ nach Nutzungsbereichen jedes Haus-Archetyps mit dem Korrekturfaktor der Repräsentativität  $K_r$  multipliziert, um einen neuen, kalibrierten „Endenergieverbrauchskennwert (EEVK)“ zu erhalten.

Hierbei muss jedoch erwähnt werden, dass der Unterschied zwischen den Ergebnissen der ersten Simulation mit dem TREM-Modell für die drei untersuchten Länder (Deutschland, UK und Chile) nicht größer als 1% war und daher die Verwendung dieses zweiten Korrekturfaktors nicht notwendig war.

#### ***Modellierungsschritt 4: Bestimmung der wahrscheinlichsten Variation der Endenergiekennwerte für Raumwärme durch Variation der Klimabedingungen und der Wärmeverluste der Gebäude***

Ziel des dritten Modellierungsschritts ist die Bestimmung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung der möglichsten Variation der kalibrierten Endenergiekennwerte für Raumwärme, in Relation zu den klimatischen Bedingungen und den Wärmeverlusten der Gebäude.

Entsprechen der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 4 ist der Endenergiebedarf für Raumwärme stark abhängig von der Innentemperatur der Gebäude und der Außentemperatur (Klimabedingungen), gefolgt von den Lüftungs- und Transmissionswärmeverlusten.

Ein direktes Verfahren, um den Einfluss der Innen- und Außentemperatur auf den Endenergiebedarf für Raumwärme zu bestimmen, wäre die Verwendung von Gradtagzahlen. Die Gradtagzahlen ab einer Heizgrenze von 15°C werden durch die täglichen Differenzen zwischen der mittleren Außentemperatur und einer Bezugstemperatur (normalerweise 20°C) erhalten und zu einem Monats-/Jahreswert aufsummiert (s. Anhang A.3) [153]. Allerdings ist mit Hilfe dieses Verfahrens die Bestimmung des Heizwärmebedarfs eines Gebäudes aufgrund unterschiedlicher Wärmeverluste je nach Typ und Konstruktionsweise nicht möglich. Hierbei ist bekannt, dass je niedriger die Wärmeverluste der Wohngebäude sind, desto niedriger auch der Einfluss der Außentemperatur auf die Raumlufttemperatur ausfällt [258-260].

Da in dieser Arbeit verschiedene Haus-Archetypen mit unterschiedlichem Wärmeverlust betrachtet werden, wird eine andere Methode verwendet, nämlich die der sogenannten „Heizgradtage“. Die „Heizgradtage“ werden durch die Differenzen zwischen den Außentagesdurchschnittstemperaturen und der „Heizgrenztemperatur“ berechnet und zu einem Monatswert aufsummiert. Die Heizgrenztemperatur ist hierbei eine mittlere Außentemperatur, ab der in einem Gebäude nicht mehr geheizt wird. Dieses Verfahren ermöglicht die Verwendung von unterschiedlichen Heizgrenztemperaturen für verschiedene Gebäude mit unterschiedlichen Baucharakteristiken. Beispielsweise definieren IWU und IES [261] die Heizgrenztemperatur für Bestandsgebäude in Deutschland mit 15°C und die Heizgrenztemperatur für Niedrigenergiehäuser und Passivhäuser mit 12°C bzw. 10°C.

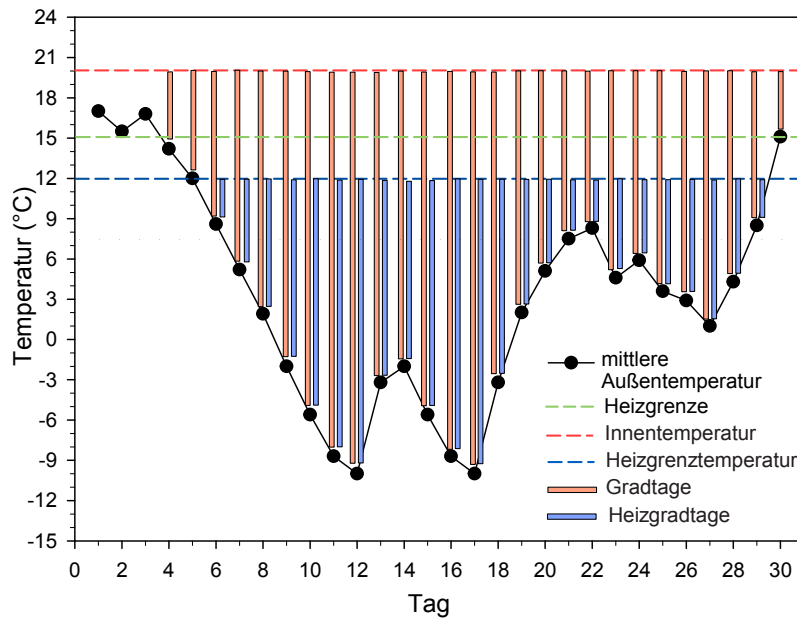
Abb. 5.8 zeigt den Unterschied zwischen den Gradtagen und den Heizgradtagen für ein Gebäude mit einer Heizgrenztemperatur von 12°C. Die Berechnung der Gradtage (GTZ) und Heizgradtage (HGT) werden mit den Gleichungen 5.6 bzw. 5.7 durchgeführt:

$$GTZ_{\Theta_i/15} = \sum_1^z (\Theta_i - \Theta_e) \quad (5.6)$$

$$HGT_{\Theta_h} = \sum_1^z (\Theta_h - \Theta_e) \quad (5.7)$$

mit:

- $GTZ$  – Gradtage bei einer bestimmten Innentemperatur  $\Theta_i$
- $HGT$  – Heizgradtage
- $z$  – Anzahl der meteorologischen Heiztage
- $\Theta_i$  – mittlere Innentemperatur
- $\Theta_h$  – Heizgrenztemperatur
- $\Theta_e$  – mittlere Außentemperatur des jeweiligen Heiztages



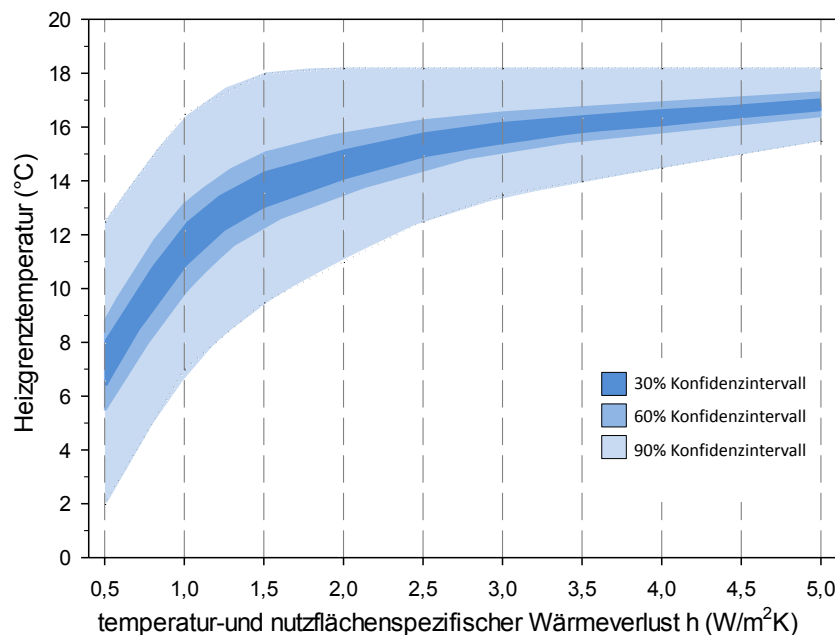
**Abb. 5.8:** Unterschied zwischen der Bestimmung von Gradtagzahlen und Heizgradtagen am Beispiel eines Gebäudes mit einer Heizgrenztemperatur von 12°C. Abgeleitet aus Datenquelle: [153]

Um die Übertragbarkeit des TREM-Modells auf verschiedene Länder zu gewährleisten, wird das Verhältnis zwischen Heizgrenztemperatur und nutzflächenspezifischem Wärmeverlust  $h$  durch Transmission und Lüftung pro Kelvin Temperaturdifferenz und  $m^2$  Energiebezugsfläche, in diesem Fall der Nutzfläche, berücksichtigt<sup>10</sup>. Dies erfolgt in Anlehnung

<sup>10</sup>  $h$ : der nutzflächenspezifische Wärmeverlust ist der Quotient aus der Summe der Wärmetransferkoeffizienten für Lüftung und Transmission eines Gebäudes ( $H_V + H_T$ ) und der Energiebezugsfläche  $A_{EB}$ .  $h = \frac{H_T + H_V}{A_{EB}}$ . Hierbei ist die Energiebezugsfläche die beheizte Wohnfläche oder „Gebäudenutzfläche“ nach EnEV.

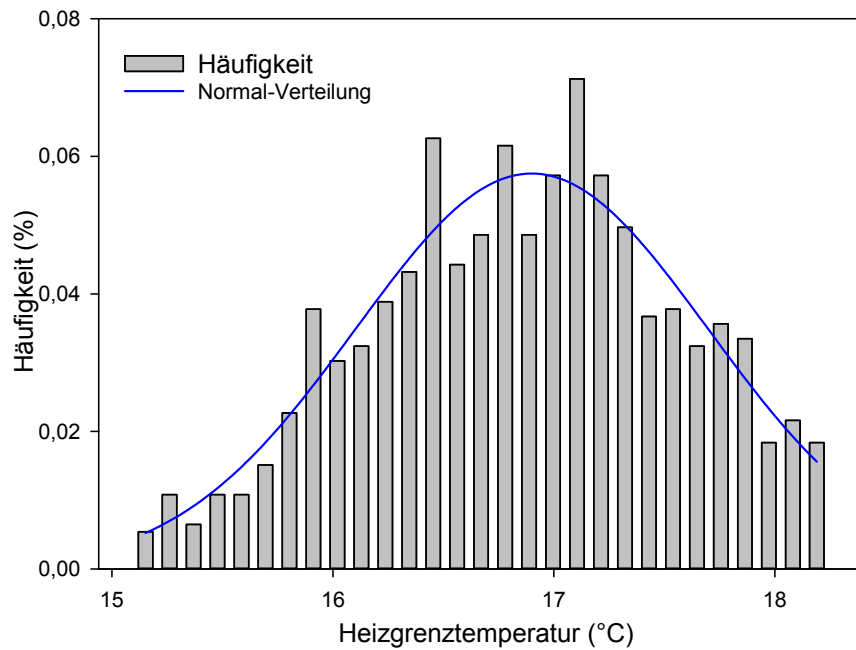


an Loga [262]. In der Studie „Die Heizperiodenbilanz im Vergleich zum Monatsbilanzverfahren“ zeigt Loga [262], dass die Heizgrenztemperatur für Gebäude mit einem hohen nutzflächenspezifischen Wärmeverlust  $h$  [ $W/m^2K$ ] höher ist, als für Gebäude mit einem niedrigen nutzflächenspezifischen Wärmeverlust  $h$  (Abb. 5.9). Es ist zu erwähnen, dass die Werte, die in Abb. 5.9 gezeigt werden, für Deutschland aufgestellt wurden und für andere Länder je nach der angestrebten Innentemperatur etwas abweichen können [258].

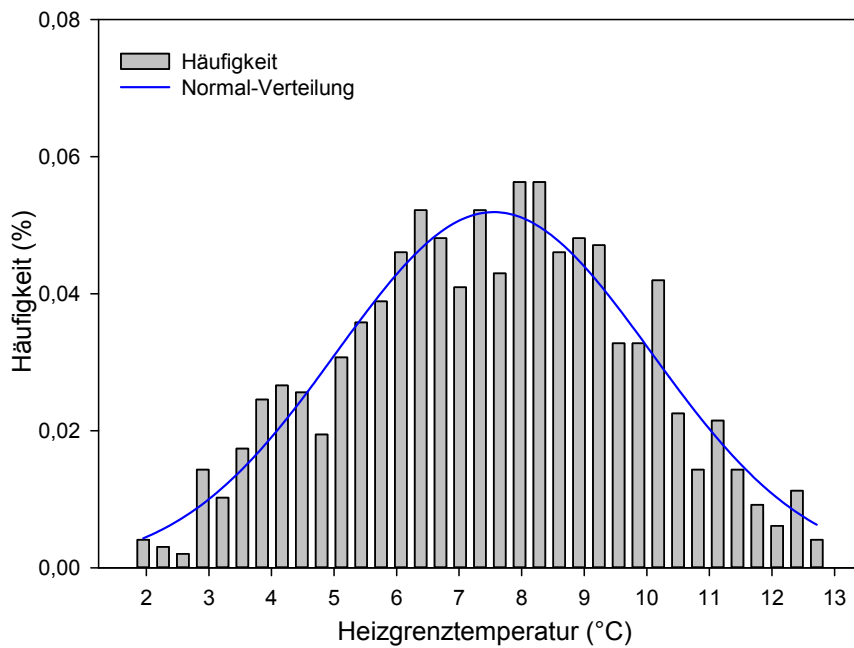


**Abb. 5.9:** Heizgrenztemperatur für Gebäude mit unterschiedlichen nutzflächenspezifischen Wärmeverlusten  $h$  [ $W/m^2K$ ]. Abgeleitet aus Datenquelle: [262]

In Ergänzung zu Abb. 5.9 lässt sich die Wahrscheinlichkeit von Heizgrenztemperaturen entsprechend dem nutzflächenspezifischen Wärmeverlust eines Gebäudes darstellen. Abb. 5.10 zeigt exemplarisch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Heizgrenztemperatur eines Gebäudes mit einem Wärmeverlust  $h = 5 W/m^2K$  und Abb. 5.11 die eines Gebäudes mit einem Wärmeverlust  $h = 0,5 W/m^2K$ . Abb. 5.10 und Abb. 5.11 stellen hierbei zwei Schnitte von Abb. 5.9 in Bezug auf zwei unterschiedliche nutzflächenspezifische Wärmeverluste dar. Es ist zu sehen, dass für Gebäude mit einem niedrigen Wärmeverlust (Abb. 5.11) die Schwankung der Heizgrenztemperatur größer ist als für Gebäude mit einem hohen Wärmeverlust (Abb. 5.10). Dies resultiert daraus, dass Loga [262] den Einfluss von verschiedenen Parametern betrachtet hat, wie verschiedenen interner Wärme-



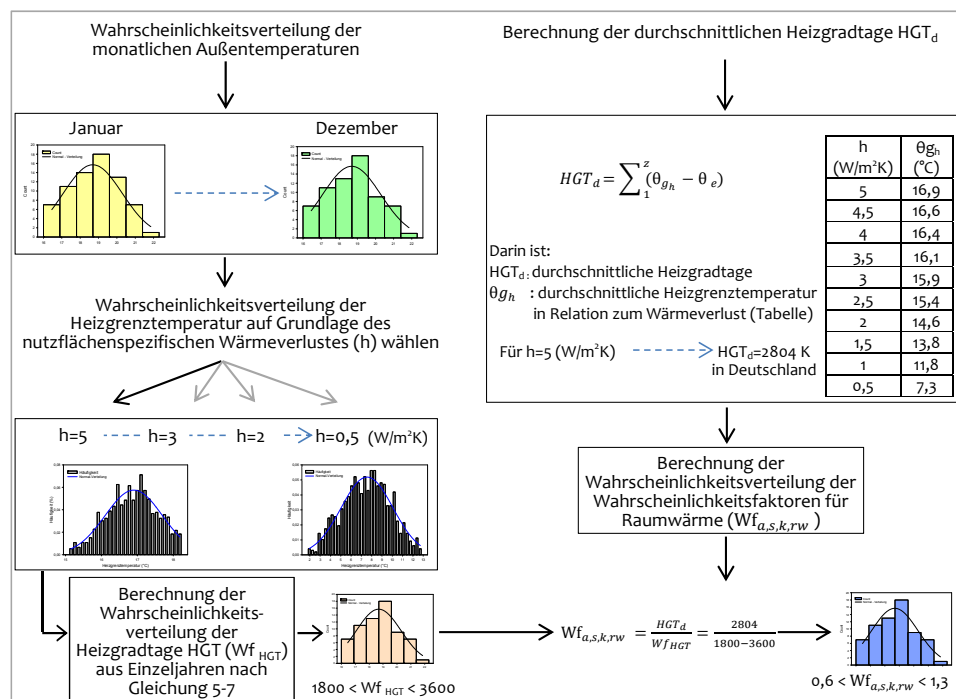
**Abb. 5.10:** Heizgrenztemperatur für Gebäude mit einem nutzflächenspezifischen Wärmeverlust  $h = 5 \text{ [W/m}^2\text{K]}$



**Abb. 5.11:** Heizgrenztemperatur für Gebäude mit einem nutzflächenspezifischen Wärmeverlust  $h = 0,5 \text{ [W/m}^2\text{K]}$

quellen ( $5 \text{ W/m}^2$  und  $2,5 \text{ W/m}^2$ ), unterschiedlichen Innentemperaturen ( $19^\circ\text{C}$  und  $21^\circ\text{C}$ ) und verschiedenen solaren Einstrahlungen aufgrund unterschiedlicher Fensterflächenanteile (0,15-0,30-0,45). Diese Eingangsparameter spielen eine größere Rolle je niedriger der Wärmeverlust durch die Außenhülle ist.

Für zwei Gebäude mit gleichem Wärmeverlust von  $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , gleichen inneren Wärmequellen von  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$  aber unterschiedlichen Fensterflächenanteilen ist die Heizgrenztemperatur für das Gebäude mit niedrigem Fensterflächenanteil größer als für das Gebäude mit einem hohen Fensterflächenanteil, da dem Gebäude mit größerer Fensterfläche mehr Sonnenenergie als zusätzliche Wärmequelle zur Verfügung steht.



**Abb. 5.12:** Algorithmus-A zur Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung von Wahrscheinlichkeitsfaktoren für Raumwärme ( $Wf_{a,s,k,rw}$ ) aufgrund der Variation von Innen- und Außentemperatur am Beispiel eines Gebäudetyps mit einem nutzfächenspezifischen Wärmeverlust  $h = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$

Abb. 5.12 zeigt den Algorithmus-A des TREM-Modells zur Bestimmung der Variation der Endenergiekennwerte für Raumwärme in Relation zur Variation der Klimabedingungen, repräsentiert durch die Heizgradtage, und dem nutzfächenspezifischen Wärmeverlust. Hier wurde als Beispiel ein Haus-Archetyp mit einem Wärmeverlust  $h = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$  betrachtet. Mit Hilfe dieses Algorithmus erhält man eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, welche Wahrscheinlichkeitsfaktoren  $Wf_{a,s,k,rw}$  je Haus-Archetyp für Raumwärme beinhaltet. Diese Wahrscheinlichkeitsfaktoren liegen für das Beispielgebäude mit  $h = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$

im Bereich von  $0,6 < Wf_{a,s,k,rw} < 1,3$  und werden mit den Kennwerten des Endenergieverbrauchs für Raumwärme multipliziert, um die wahrscheinlichste Schwankung der Kennwerte zu bestimmen (Gleichung 5.8).

$$EEVK_{rw,t_R} = \sum EEVK_{a,s,k,rw,t_R} \cdot Wf_{a,s,k,rw} \quad (5.8)$$

mit:

$EEVK_{rw,t_R}$	– Endenergiekennwerte für Raumwärme im Referenzjahr
$EEVK_{a,s,k,rw,t_R}$	– kalibrierter Kennwert des Endenergieverbrauchs für Raumwärme je Haus-Archetyp, Baujahr und Klimazone
$Wf_{a,s,k,rw}$	– Wahrscheinlichkeitsfaktoren, ermittelt entsprechend dem Algorithmus-A in Abb. 5.12
$rw$	– Raumwärme

### ***Modellierungsschritt 5: Bestimmung der wahrscheinlichsten Variationen der Endenergiekennwerte anderer Nutzungsbereiche***

Für die Bestimmung der wahrscheinlichsten Variationen der Endenergiekennwerte in anderen Nutzungsbereichen (Warmwasser, Kochen, Beleuchtung und Elektrogeräte) werden ebenfalls Wahrscheinlichkeitsfaktoren verwendet. Aus diesem Grund wird die Gleichung 5.8 zu einer allgemeinen Gleichung 5.9 erweitert.

Hier werden die Wahrscheinlichkeitsfaktoren mit repräsentativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen für jedes Land bestimmt, die die partikulare Variation des Energieverbrauchs nach Nutzungsbereichen am genauesten beschreiben können. Für die Fallbeispiele Deutschland, Vereinigtes Königreich und Chile wurden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus statistischen Daten entwickelt.

$$EEVK_{nb} = \sum EEVK_{a,s,k,nb} \cdot Wf_{a,s,k,nb} \quad (5.9)$$

mit:

$nb$  – Nutzungsbereiche (z.B. Warmwasser, Kochen, Beleuchtung, Elektrogeräte)

### ***Modellierungsschritt 6: Berechnung des Nutzenergieverbrauchs nach Nutzungsbereich und Haus-Archetypen im Referenzjahr***

Ein über Gesetze oder Verordnungen regulierbarer Parameter, der einen bedeutenden Einfluss auf den Endenergieverbrauch ausübt, ist der Nutzungsgrad der Anlagen/Geräte für Raumwärme, Warmwasser und Kochen sowie zu einem geringen Teil auch der Wirkungsgrad der eingesetzten Beleuchtung und Elektrogeräte (s. auch Abschnitt 2.3 und Kapitel 4). Aus diesem Grund nutzt das hier beschriebene Prognosemodell Daten für die Entwicklung des Nutzungsgrades, um den Nutzenergieverbrauch im Referenzjahr zu bestimmen.

Hierbei wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung der kalibrierten Endenergieverbrauchskennwerte im Referenzjahr (Modellierungsschritte 4 und 5) mit dem für dieses Jahr ermittelten durchschnittlichen Nutzungsgrad multipliziert, um den Nutzenergiebedarf in den einzelnen Nutzungsbereichen zu bestimmen (Gleichung 5.10).

$$NE_{a,s,k,nb,t_R} = EEVK_{a,s,k,nb,t_R} \cdot n_{a,s,k,nb,t_R} \quad (5.10)$$

mit:

- $NE_{a,s,k,nb,t_R}$  – Kennwert für den Nutzenergiebedarf im Referenzjahr  $t_R$
- $EEVK_{a,s,k,nb,t_R}$  – kalibrierter Endenergieverbrauchskennwert für das Referenzjahr  $t_R$
- $n_{a,s,k,nb,t_R}$  – Nutzungsgrad der Anlagen/Geräte für das Referenzjahr  $t_R$

Zur Erstellung eines durchschnittlichen Nutzungsgrades für jeden einzelnen Nutzungsbereich wurde ein Mittelwert aller einzelnen Werte im Referenzjahr mit Wichtung auf dem Anteil der einzelnen Energiequellen berechnet. Die Daten des Nutzungsgrades für das Referenzjahr werden hierbei aus statistischen Studien entnommen. Zum Beispiel wurde für das UK die Datenbasis von CHM [19] verwendet, welche mehr als 16.000 Daten des Nutzungsgrades für das Jahr 2005 enthält. Hierbei wurde beispielweise ermittelt, dass der durchschnittliche Nutzungsgrad für Raumwärme rund 0,82 im Jahr 2005 betrug. Zur Ermittlung des durchschnittlichen Nutzungsgrades für verschiedene Nutzbereiche in Chile wurden Daten aus einer Studie der CDT (Corporación de Desarrollo Tecnológico) [263] verwendet. Diese Studie umfasst Energiekennndaten (u.a. Endenergieverbrauchskennwerte nach Haus-Archetyp und Nutzungsbereichen, Energiequelle, Nutzungsgrad der Anlagen/-Geräte) aus einer Stichprobe von mehr als 3.000 Wohngebäuden. Hierbei wurde ermittelt, dass der durchschnittliche Nutzungsgrad für Raumwärme rund 0,80 im Jahr 2008 betrug.

### ***Modellierungsschritt 7: Bestimmung des zukünftigen Endenergiebedarfs nach Nutzungsbereich und Haus-Archetyp***

Zur Bestimmung des zukünftigen Endenergiebedarfs nach Nutzungsbereich und Haus-Archetyp werden Daten der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Nutzenergieverbrauchs-kennwerte im Referenzjahr  $t_R$  (Gleichung 5.10) und Daten zur Entwicklung des Nutzungsgrades verwendet.

Mit Hilfe der zukünftigen Entwicklung des Nutzungsgrades der Anlagen/Geräte und der wahrscheinlichsten Nutzenergieverbrauchs-kennwerte des dazugehörigen Haus-Archetyps wird die gesamte zukünftige Entwicklung des Endenergiebedarfs (EEBges) bestimmt. Wie in Gleichung 5.11 dargestellt, wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Nutzenergieverbrauchs-kennwerte nach Haus-Archetypen ohne Sanierung konstant bleibt, sich aber die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Endenergieverbrauchs-kennwerte ändern wird, aufgrund der Entwicklung des Nutzungsgrades der Anlagen/Geräte.

$$EEB_{ges}(t) = \sum_{2000}^t GB_{tot,a,s,k}(t) \cdot \frac{NE_{a,s,k,nb}(t)}{n_{a,s,k,nb}} \quad (5.11)$$

mit:

$EEB_{ges}(t)$  – Entwicklung des Endenergiebedarfs im Prognosezeitraum ( $t$ )

Mit Gleichung 5.11 folgt der Modellierungsansatz den Methoden, die bereits in den Modellen MAED-2 [9], BREHOMES [20], LEAP [10], FfE-Gebäudemodell [16], ECCABS [177], CHM [19] und CDEM [62] zur Anwendung kommen. Dieser Ansatz erfordert prinzipiell eine jährliche Überprüfung des Nutzungsgrades der Anlagen/Geräte. Da solche Studien in der Regel nicht vorhanden sind, wurde im BREHOMES-Modell die Verwendung von Sättigungskurven (Abschnitt 2.3) vorgeschlagen.

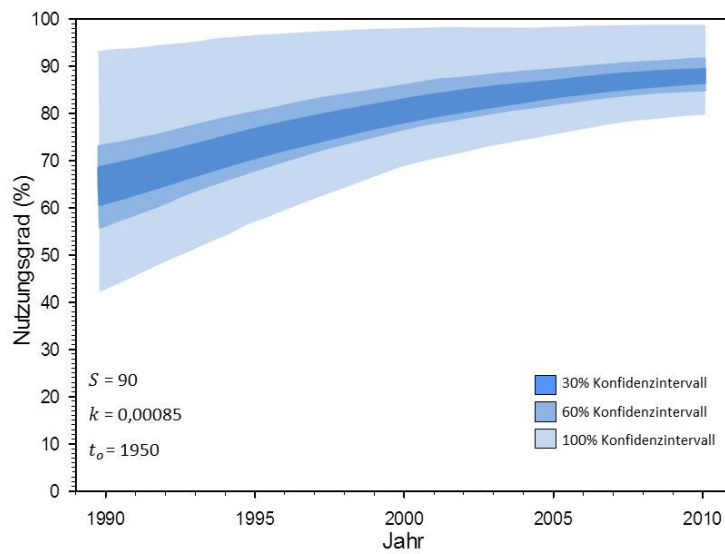
Die Nutzung von Sättigungskurven (S-Kurve) erfordert mindestens zwei Werte des Nutzungsgrades in zwei verschiedenen Jahren und eine Geschwindigkeitskonstante, welche die Form der S-Kurve beschreibt. Da in der Fallstudie für Deutschland festgestellt wurde, dass bisher noch keine repräsentative Studie erstellt worden ist, welche die langfristige Entwicklung des Nutzungsgrades von Anlagen/Geräten aufzeigt, wurde, wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, die Entwicklung des Nutzungsgrades auf Basis verschiedener Studien und mit Hilfe von Sättigungskurven ermittelt. Diese Sättigungskurven werden im TREM-Modell verwendet.

Wie bereits erwähnt, wurde für das UK und Chile festgestellt, dass es Daten zum Nutzungsgrad nur für spezifische Jahre gibt, aber keine Studie, welche die langfristige Entwicklung darstellt. Da es für das Fallbeispiel Chile nur Daten für ein einzelnes Jahr (2008) gibt, ist die Verwendung von Sättigungskurven daher nicht möglich. Aus diesem Grund gibt es für Länder, die keine genügenden Daten zur Entwicklung des Nutzungsgrades durch Sättigungskurven aufweisen, im TREM-Modell die Möglichkeit zur Verwendung eines Musters von Wahrscheinlichkeitsbändern für die Entwicklung des Nutzungsgrades für Raumwärme ( $S = 90$ ,  $K = 0,00085$ ,  $t_0 = 1950$ ) und Warmwasser ( $S = 87$ ,  $K = 0,00075$ ,  $t_0 = 1950$ ). Hierbei sind  $S$ ,  $K$  und  $t_0$  die Eingangsparameter zur Bestimmung der S-Kurven, entsprechend der Gleichung 2.1 in Abschnitt 2.3.

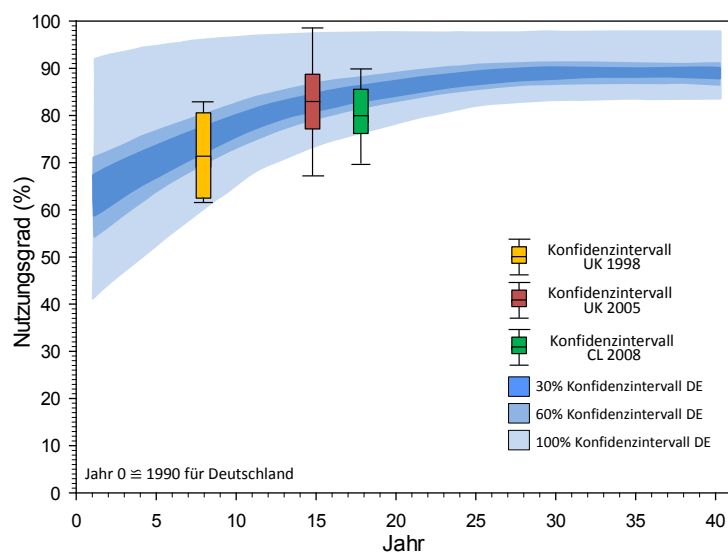
Abb. 5.13 zeigt das Muster der Wahrscheinlichkeitsbänder für die Entwicklung des Nutzungsgrades für Raumwärme. Hierbei muss erklärt werden, dass diese Wahrscheinlichkeitsbänder vom Beispiel Deutschland abgeleitet wurden und dass sich die Entwicklung des Nutzungsgrades in anderen Weltregionen auch anders darstellen kann.

Abb. 5.14 zeigt im Hintergrund (blaue Bereiche) beispielsweise das Muster für die Wahrscheinlichkeitsbänder der Entwicklung des Nutzungsgrades für Raumwärme in einem Zeitraum von 40 Jahren. Die ersten 20 Jahre wurden auf Basis verschiedener Studien im deutschen Wohnungssektor entwickelt (Abb. 5.13) und die letzten 20 Jahre wurden mit Hilfe von Sättigungskurven (Abschnitt 2.3) ermittelt. In den Mustern der Wahrscheinlichkeitsbänder der Entwicklung des Nutzungsgrades für Raumwärme werden die ermittelten Nutzungsgrade von spezifischen Jahren für UK und Chile gezeigt (Abb. 5.14). Hierbei ist zu sehen, dass sich der ermittelte Nutzungsgrad von spezifischen Jahren für das UK und Chile in den Mustern der Wahrscheinlichkeitsbänder befindet. Außerdem weist am Fallbeispiel UK der ermittelte Nutzungsgrad der spezifischen Jahre 1998 und 2005 eine ähnliche Entwicklung wie in Deutschland auf. Der Grund dafür liegt in der engen Verknüpfung von Märkten und außerdem in der Verwendung der gleichen grundlegenden Richtlinien innerhalb des europäischen Raums [264, 265].

Für das Fallbeispiel Chile kann beobachtet werden, dass der ermittelte Nutzungsgrad für Raumwärme im Jahr 2008 niedriger war, als der durchschnittliche Nutzungsgrad für das Wahrscheinlichkeitsband des TREM-Modell Musters (Abb. 5.14). Zur Kalibrierung der Werte des Nutzungsgrades, wurde der Einzelwert des Jahres 2008 um sieben Jahre in die Vergangenheit verschoben (Abb. 5.15). So wird versucht, die Entwicklung des Nutzungsgrades für Raumwärme in Chile auf die Entwicklung des Nutzungsgrades des Modellmusters anzupassen.

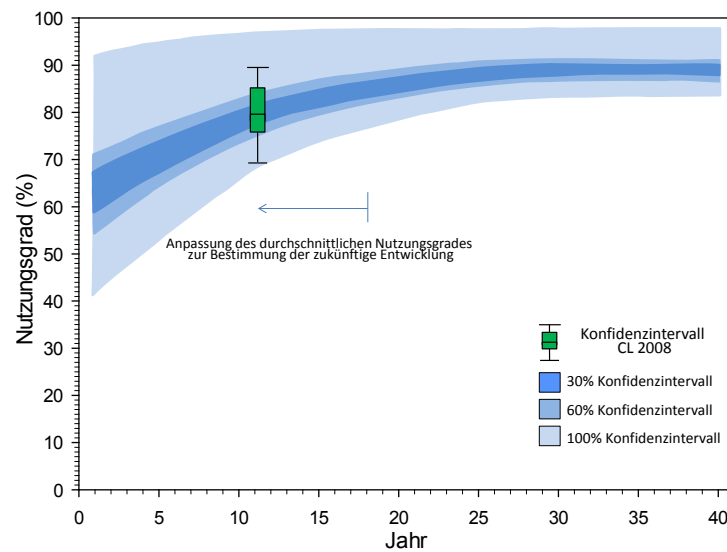


**Abb. 5.13:** Muster von Wahrscheinlichkeitsbändern der Entwicklung des durchschnittlichen Nutzungsgrades für die Bereitstellung von Raumwärme in Deutschland. Abgeleitet aus Datenquellen: [156,160-163,165,169,170]

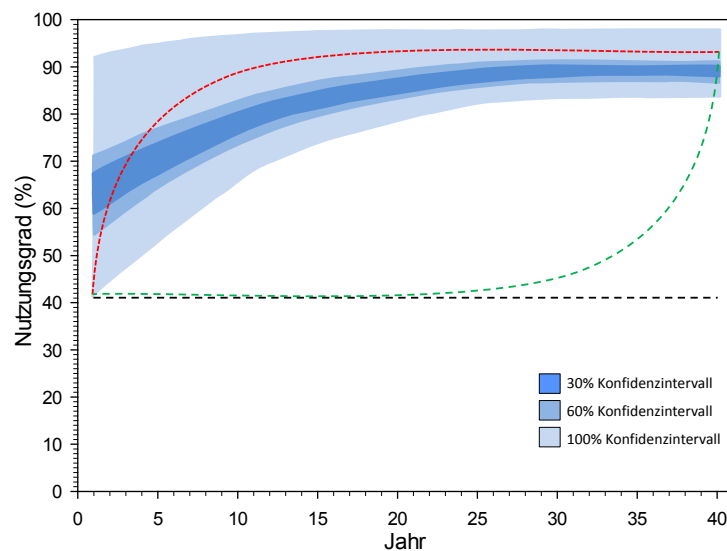


**Abb. 5.14:** Vergleich statistischer Daten für den Nutzungsgrad für Raumwärme von UK und Chile (CL) für spezifische Jahre sowie das Muster von Wahrscheinlichkeitsbändern des TREM-Modells. Datenquellen: [19, 38, 263]





**Abb. 5.15:** Anpassung des durchschnittlichen Nutzungsgrades zur Bestimmung der zukünftigen Entwicklung für Raumwärme für das Fallbeispiel Chile



**Abb. 5.16:** Unterschied zwischen dem Muster der Wahrscheinlichkeitsbänder des TREM-Modells und der möglichen tatsächlichen Entwicklung des Nutzungsgrades für Raumwärme

In quantitativer Hinsicht wird mit der Verwendung der Muster von Wahrscheinlichkeitsbändern des TREM-Modells impliziert, dass die zukünftige Entwicklung des Nutzungsgrades der Anlagen/Geräte von anderen Ländern eine ähnliche Entwicklung wie in Deutschland haben wird. So wird zum Beispiel angenommen, dass die Entwicklung des Nutzungsgrades für Raumwärme in Chile ab dem Jahr 2008 dieselbe Entwicklung wie in Deutschland ab dem Jahr 2001 aufweist.

Diese Annahme birgt eine gewisse Unsicherheit, da die zukünftige Entwicklung des Nutzungsgrades der Anlagen/Geräte eines beliebigen Landes nicht unbedingt dieselbe Entwicklung wie in Deutschland haben muss. In einem Zeitraum von 40 Jahren zur Entwicklung des Nutzungsgrades für Raumwärme könnte theoretisch durch ein rapider Anstieg am Anfang (rote Linie in Abb. 5.16) oder am Ende des Zeitraumes stattfinden (grüne Linie in Abb. 5.16). In diesen Fällen würden die Ergebnisse des Endenergiebedarfs nur am Anfang und am Ende des Zeitraums übereinstimmen. Entsprechend der Sensitivitätsanalyse (s. Anhang D) bewirkt eine 1%ige Variation des Nutzungsgrades der Heizanlage im durchschnitt eine 0,8%ige Variation des Endenergiebedarfs. Dies bedeutet, dass falls die Entwicklung des Nutzungsgrades sich wie in den dargestellten Szenarien (grüne und rote Linie) entwickelt, die Unsicherheit aufgrund der Nutzung des Musters von Wahrscheinlichkeitsbändern des TREM-Modells über bis zu 30% beträgt.

Ein weiteres Szenario zur Entwicklung des Nutzungsgrades wäre, dass es im gesamten Zeitraum keine Verbesserung der Nutzungsgrade der Anlagen Zeitraum gibt (schwarze Linie in Abb. 5.16). Dies bedeutet, dass über den Betrachtungszeitraum von 40 Jahren eine bedeutende Abnahme des Endenergiebedarfs ( $< 36\%$ ) aufgrund einer Verbesserung des Nutzungsgrades der Anlagen angenommen würde, die es nicht gibt.

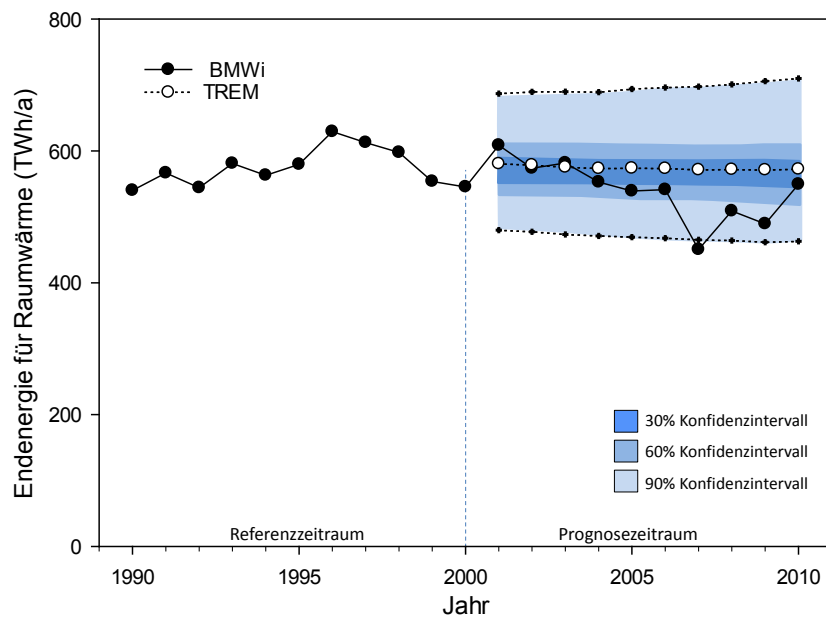
## **5.2 Überprüfung des Modells mit historischen Daten des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor**

Zentraler Ausgabeparameter des TREM-Modells ist der Endenergiebedarf im Wohnungssektor, aufgeschlüsselt nach Nutzungsbereichen und versehen mit einem Wahrscheinlichkeitsband mit drei Konfidenzintervallen (30%, 60% und 90%). Abb. 5.17 zeigt die Ergebnisse des Modells für die Entwicklung des Endenergiebedarfs für Raumwärme im deutschen Wohnungssektor im Prognosezeitraum (2001–2010). Hier ist zu sehen, dass sich der tatsächliche Endenergieverbrauch für Raumwärme nach BMWi [64] bis auf einen Ausreißer im Jahr 2007 im Wahrscheinlichkeitsband der Ergebnisse des TREM-Modells befindet. Weiterhin ist zu verzeichnen, dass der grundsätzliche abnehmende Trend der Entwicklung

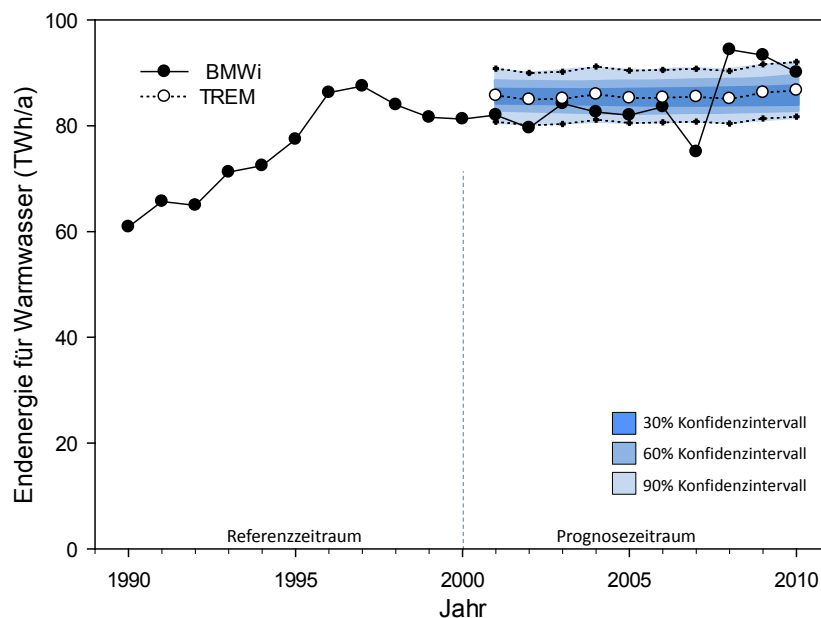
des Endenergieverbrauchs für Raumwärme mit den Ergebnissen des Modells übereinstimmt ( $r^2 > 0,64$ ). Dies resultiert daraus, dass das TREM-Modell die Auswirkung der Sanierung von Bestandsgebäuden, den niedrigeren Endenergieverbrauch für Raumwärme von Neubauten und die mit der Zeit erfolgende Verbesserung des Nutzungsgrades von Heizanlagen berücksichtigt, was in der Summe für den deutschen Wohnungssektor eine Reduktion des Endenergiebedarfs für Raumwärme zur Folge hat.

Abb. 5.18 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs für Warmwasserbereitstellung in Deutschland. Der Trend des modellierten Endenergiebedarfs weist eine leichte Zunahme auf. Das liegt daran, dass der einzige limitierende Faktor des Endenergiebedarfs für Warmwasserbereitstellung die Entwicklung des Nutzungsgrades der hierzu genutzten Anlagen ist, das Wachstum der Anzahl der Gebäude und damit die Höhe des Endenergieverbrauchs jedoch einen größeren Einfluss hatten als die Auswirkungen des mit der Zeit verbesserten Nutzungsgrades. Das gleiche Muster ist in der Entwicklung des Endenergiebedarfs für die Bereiche Kochen, Beleuchtung und Elektrogeräte zu beobachten (Abb. 5.19 und Abb. 5.20).

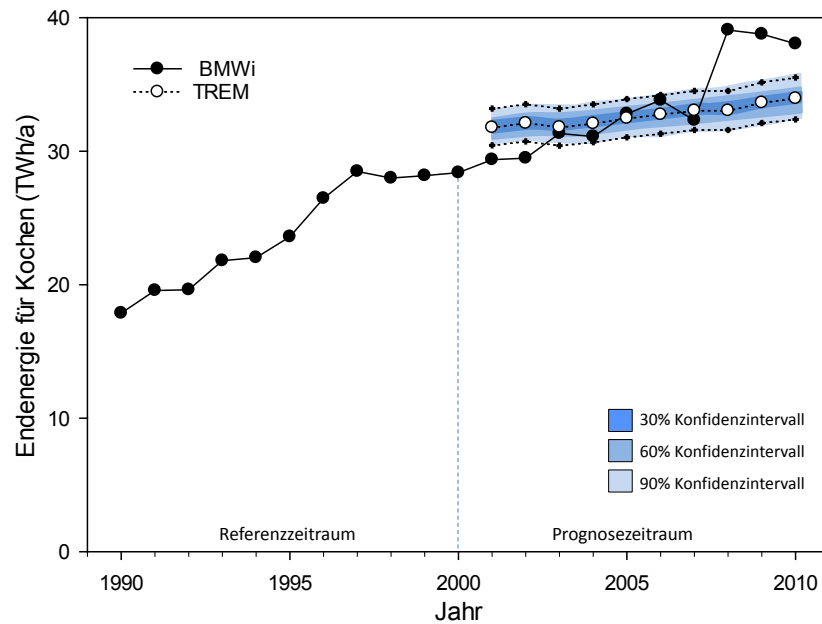
Wenn die Wahrscheinlichkeitsbänder der Abb. 5.17 und Abb. 5.18 miteinander verglichen werden, kann gesehen werden, dass das Wahrscheinlichkeitsband für Raumwärme eine größere Breite bzw. Unsicherheit als das für Warmwasserbereitstellung aufweist. Dies liegt daran, dass für die Bestimmung der wahrscheinlichsten Variation der Endenergiekennwerte für Raumwärme die Eingangsparameter mit einer größeren Unsicherheit (Variation der Innen- und Außentemperatur, Wärmeverlust der Gebäude) als für die andere Nutzungsbe-  
reiche (in diesem Fall Warmwasserbereitstellung) verbunden sind (s. Modellierungsschritte 4 und 5 in Abschnitt 5.1).



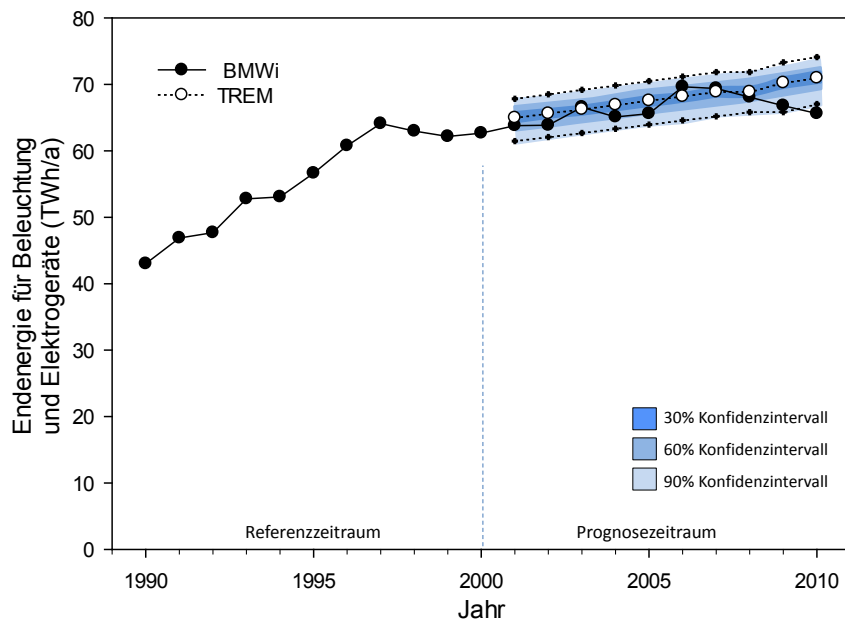
**Abb. 5.17:** Vergleich zwischen statistischen Daten für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor (BMW) und den Modellergebnissen für die Entwicklung des Endenergiebedarfs (TREM) für Raumwärme



**Abb. 5.18:** Vergleich zwischen statistischen Daten für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor (BMW) und den Modellergebnissen für die Entwicklung des Endenergiebedarfs (TREM) für Warmwasserbereitstellung

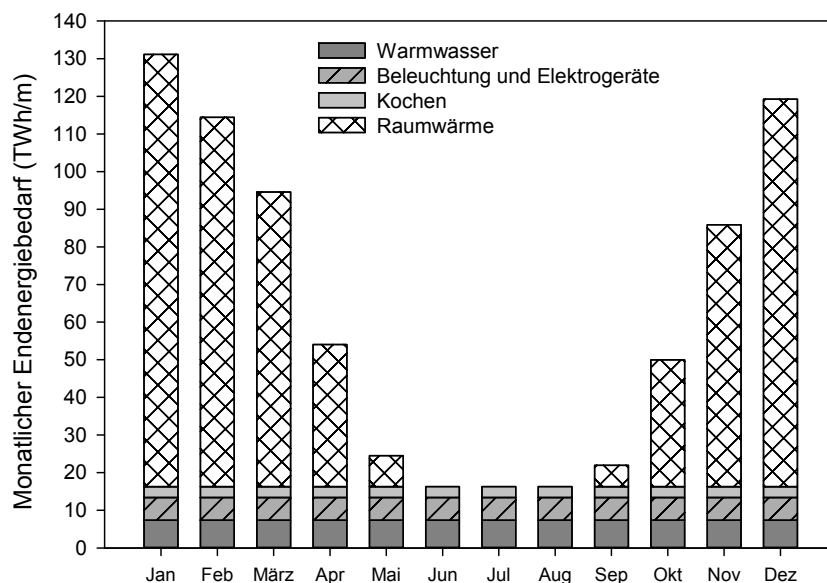


**Abb. 5.19:** Vergleich zwischen statistischen Daten für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor (BMWi) und den Modellergebnissen für die Entwicklung des Endenergiebedarfs (TREM) für den Nutzungsbereich Kochen



**Abb. 5.20:** Vergleich zwischen statistischen Daten für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor (BMWi) und den Modellergebnissen für die Entwicklung des Endenergiebedarfs (TREM) für Beleuchtung und Elektrogeräte

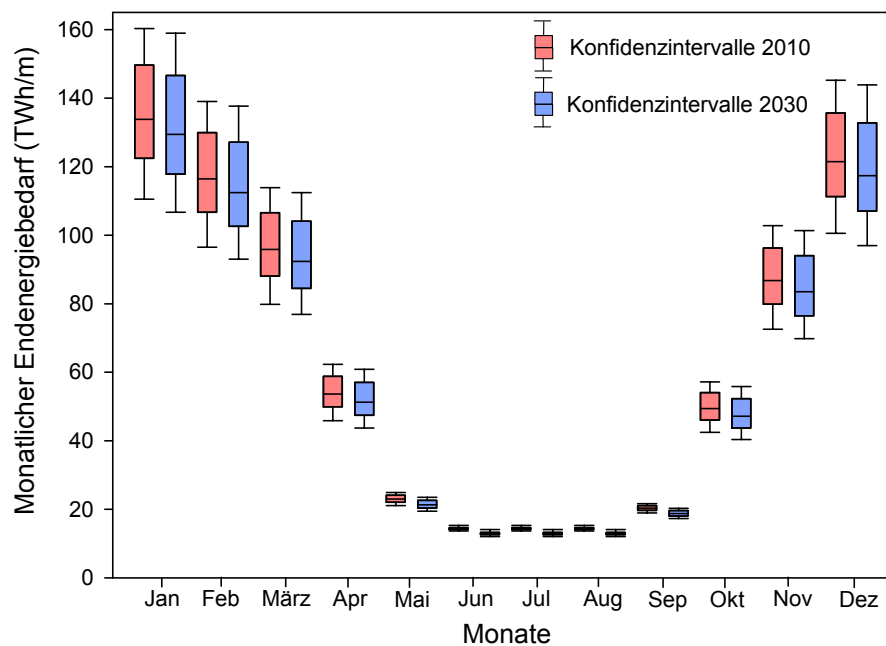
Die Abb. 5.18 und Abb. 5.19 zeigen, dass sich die statistischen Daten des Endenergieverbrauchs für Warmwasserbereitstellung und Kochen ab dem Jahr 2008 nicht in den Wahrscheinlichkeitsbändern des TREM-Modells befinden. Ein Grund dafür könnte in der Modellierung beider Nutzungsbereiche liegen, da zum Beispiel in die Variation des Warmwasserbedarfs durch jährliche Schwankungen der Außentemperatur nicht mit berücksichtigt wird. Ein weiterer Grund könnte der Wechsel in der verwendeten Methodologie zur Bestimmung des Endenergieverbrauchs in den statistischen Daten sein, da die Daten bis 2007 der Methodologie des Öko-Instituts und dem FhG-ISI folgen [147] und ab 2008 die Methodologie von AGEB verwendet wurde [182] (s. Abschnitt 2.3 und Abschnitt 4.1).



**Abb. 5.21:** Durchschnittlicher monatlicher Endenergiebedarf im deutschen Wohnungssektor für das Jahr 2010 entsprechend der Simulation mit dem TREM-Modell

Ein weiteres Ergebnis, das mit dem TREM-Modell erhalten werden kann, ist der durchschnittliche monatliche Verlauf des Endenergiebedarfs in jedem Nutzungsbereich. Abb. 5.21 zeigt am Beispiel des Jahres 2010 die Ergebnisse des monatlichen Verlaufs des mit dem Modell ermittelten Endenergiebedarfs für den deutschen Wohnungssektor. Hierbei ist anzumerken, dass dieser monatliche Verlauf auf der Variation des Endenergiebedarfs für Raumwärme beruht (s. Abb. 5.12, Schritt 4 im Unterabschnitt 5.1.2). Der monatliche Verlauf des Endenergiebedarfs der anderen Nutzungsbereiche (Warmwasserbereitstellung, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung) wurde durch die Division des gesamten jährlichen Endenergiebedarfs durch 12 Monate ermittelt. Es fehlen folglich Angaben zu einer möglichen Variation des monatlichen Endenergiebedarfs für Warmwasserbereitstellung, Kochen, Elektrogeräte oder Beleuchtung. Eine repräsentative Datenerhebung der monatlichen Va-

riation des Endenergiebedarfs für Warmwasserbereitung, Kochen, Elektrogeräte oder Beleuchtung je Haus-Archetyp würde eine Erweiterung des TREM-Modells zur Quantifizierung der monatlichen Schwankungen in diesen Nutzungsbereichen ermöglichen. Da jedoch solche Datenerhebungen bisher noch nicht vorliegen, ist eine Erweiterung des Modells zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich.



**Abb. 5.22:** Monatliche Schwankungen des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor für das Jahr 2010 und 2030, entsprechend der Simulation mit dem TREM-Modell

Abb. 5.22 zeigt die monatlichen Schwankungen des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor für das Jahr 2010 und 2030 entsprechend der Simulation mit dem TREM-Modell. Die Ergebnisse des monatlichen Verlaufs des Endenergiebedarfs zeigen, dass in den Sommermonaten Juni bis August der Endenergiebedarf für Raumwärme erwartungsgemäß sehr gering ist, was sich im Gesamtergebnis niederschlägt. Außerdem ist in Abb. 5.22 zu sehen, dass die prognostizierte Reduktion des gesamten Endenergiebedarfs für das Jahr 2030 (Abschnitt 5.3) auch im monatlichen Verlauf sichtbar ist. Allerdings bleiben die möglichen Schwankungen in den Wintermonaten aufgrund der Unsicherheiten der Außentemperatur gleich. Dies resultiert daraus, dass im Modell die Höhe der Schwankungen für die Außentemperatur im Jahr 2030 als identisch zu der für das Jahr 2010 angenommen wird.

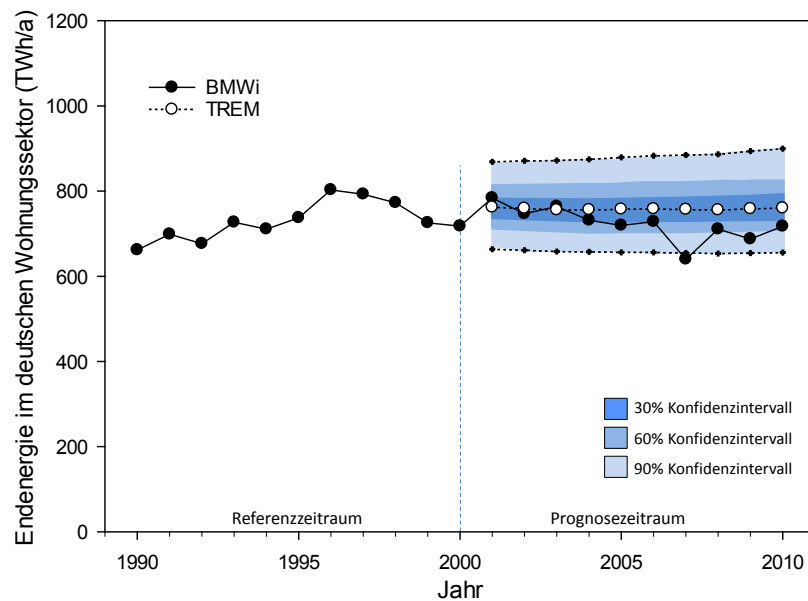
Der Vorteil der Berechnung des monatlichen Verlaufs des Endenergiebedarfs besteht darin, dass das Modell eine detaillierte Beurteilung der Auswirkungen von Energieeinsparmaßnahmen ermöglicht.

Der Vergleich zwischen der durch das BMWi ermittelten und der mit dem TREM-Modell simulierten Entwicklung des Endenergiebedarfs (Abb. 5.23) zeigt, dass sich alle statistischen Werte für den Endenergieverbrauch bis auf das Ausreißerjahr 2007 in den Wahrscheinlichkeitsbändern der Ergebnisse des TREM-Modells befinden. Die Abweichung im Jahr 2007 weist hierbei einen Unterschied von 18% zwischen dem statistischen Endenergieverbrauch nach BMWi und dem nach TREM simulierten wahrscheinlichsten Endenergiebedarf auf, der in Abb. 5.23 durch die weißen Kreise dargestellt wird. Die Differenz zwischen dem durchschnittlichen Endenergiebedarf der Simulation mit TREM und dem vom BMWi ermittelten Endenergieverbrauch beträgt für den gesamten Prognosezeitraum durchschnittlich 5%. Die bestehenden bauphysikalischen Modelle weisen im Durchschnitt einen Mittelwert der prozentualen Differenz von 6% im Prognosezeitraum auf, die Ergebnisse der statistischen Modelle hingegen liegen bei 10% (Kapitel 4). Weiterhin beträgt der Korrelationskoeffizient  $r$  rund 0,35, was als eine geringe Ähnlichkeit zwischen den mit TREM modellierten und den tatsächlichen Werten des Endenergiebedarfs bewertet wird (s. Tab. 4.1). Die bestehenden Modelle hingegen zeigen Werte von mehr als  $-0,55$  (Kapitel 4), was nach Tab. 4.1 als ein sehr großer Unterschied zwischen den modellierten und den tatsächlichen Werten für den Endenergiebedarf bewertet wird. Dies zeigt nicht nur die Fähigkeit des TREM-Modells, den Endenergiebedarf mit einer höheren Genauigkeit als die bestehenden Modellen zu prognostizieren, sondern auch, dass das TREM-Modell in der Lage ist, die Tendenz der Entwicklung des Endenergieverbrauchs und ihre möglichen Schwankungen mit einer höheren Korrelation zu bestimmen.

Das Wahrscheinlichkeitsband der modellierten Ergebnisse zeigt eine zunehmende Breite in den letzten Jahren des Prognosezeitraums. Zu erklären ist dies damit, dass die Anzahl an Gebäuden eine steigende Tendenz aufgrund der positiven betrachteten Wachstumsrate in der Modellierung aufweist, während beim Endenergieverbrauch für Raumwärme aufgrund der Sanierung von Bestandsgebäuden und der Verbesserung des Nutzungsgrades von Heizanlagen hingegen eine fallende Tendenz zu beobachten ist. Diese beiden gegenläufigen Tendenzen führen letztendlich zu einer Verbreiterung des Wahrscheinlichkeitsbandes der Prognose.

Da das TREM-Modell im Vergleich zu bestehenden Modellierungsansätzen (s. Kapitel 4) eine hohe Genauigkeit bei der Bestimmung des Endenergiebedarfs im Prognosezeitraum





**Abb. 5.23:** Vergleich zwischen der vom BMWi [64, 151] ermittelten und der mit dem TREM-Modell simulierten Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor

aufweist, wurde eine weiterführende Simulation durchgeführt, um den zukünftigen Endenergiebedarf bis 2030 im deutschen Wohnungssektor zu prognostizieren.

### 5.3 Simulation zur zukünftigen Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor

Zusätzlich zum Abgleich mit statistischen Daten für den „Prognosezeitraum“ wurde der Endenergiebedarf im deutschen Wohnungssektor von 2011 bis 2030 prognostiziert. Als neues Referenzjahr wurde hierbei das Jahr 2010 als letztes verfügbares Jahr im „Prognosezeitraum“ gewählt. Außerdem wurden zur Modellierung mit dem TREM-Modell die statistischen Daten des Zeitraums 1990–2010 verwendet. Die Ergebnisse wurden für die Jahre bis 2014, wie bereits in Abschnitt 2.3 (Abb. 2.19) mit den statischen Daten des BMWi für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor, verglichen. Die Genauigkeit des TREM-Modells im Zeitraum von 2015–2030 ist hingegen nicht anhand von statistischen Daten überprüfbar.

Prognosen zur Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor wurden von Fahl et al. (2010) [65], Hake et al. (2009) [66] und Kirchner et al. (2009) [67]

mit Hilfe von verschiedenen Modellierungsansätzen entwickelt. Fahl et al. [65] verwendeten zur Bestimmung der zukünftigen Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor eine Kopplung von verschiedenen Modellen (E2M2s, TIMES PanEU und NEWAGE). Eine detaillierte Erklärung der Interaktionen der Kopplung bzw. der Berechnungsmethoden wurde jedoch nicht publiziert. Hake et al. [66] verwendeten als Modellwerkzeug das sogenannte Energiesystem-Modell „IKARUS-LP“, Kirchner et al. [67] hingegen das sogenannte „Modell Deutschland“. Auch hier wurden keine detaillierte Beschreibungen der Berechnungsmethoden veröffentlicht.

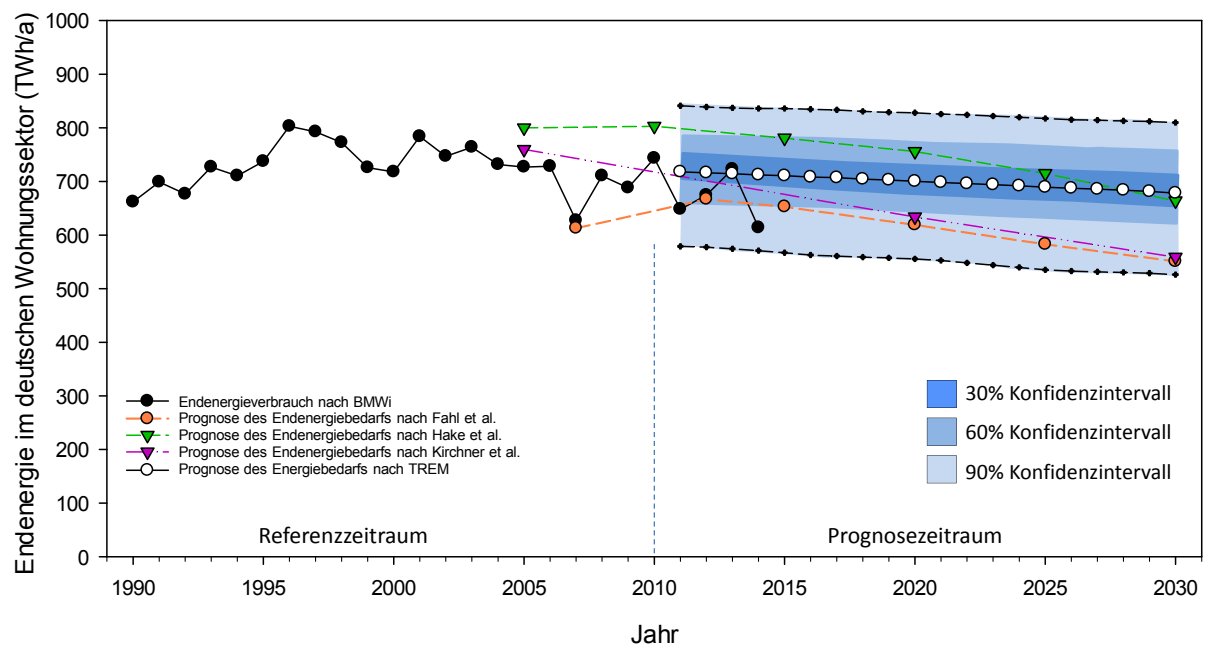
Obwohl es in den drei obengenannten Studien keine detaillierte Beschreibung der Berechnungsmethoden gibt, haben die Autoren erklärt, welche Annahmen sie getroffen haben, um eine Prognose der Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor durchzuführen.

Fahl et al. [65] gehen in ihrer Prognose von einer Zunahme der Anzahl der Wohnungen auf 42,0 Mio. Wohneinheiten im Jahr 2030 und einem Anstieg des Stromverbrauchs um insgesamt 8,4% in den Jahren 2006–2030 aus. Die Prognose des Endenergiebedarfs im gesamten Wohnungssektor zeigt jedoch eine Abnahme um 24% bis zum Jahr 2030 im Vergleich zu 2006. Dieser Rückgang wurde von Fahl et al. im Wesentlichen mit der Annahme erklärt, dass durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) Verbesserungen des Wärmeschutzes bei Neu- und Altbauten erfolgen. Eine quantitative Verbesserung des Wärmeschutzes wurde hierbei allerdings nicht gegeben.

Hake et al. [66] prognostizierten ebenfalls eine abnehmende Tendenz des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor. Für diese Prognose wurde angenommen, dass eine Senkung des Raumwärmebedarfs um ein Drittel bis 2030 vollständig durch Neubauten umgesetzt werden kann. Außerdem wird für den Altbaubestand angenommen, dass ab 2020 Maßnahmen zur Wärmedämmung für alle Altbauten innerhalb des Renovierungszyklus umgesetzt werden. Zudem wurde eine Verschärfung der energetischen Anforderungen durch eine neue Novellierung der EnEV im Jahr 2020 angenommen.

In der Prognose des Endenergiebedarfs nach Kirchner et al. [67] wurde angenommen, dass die gesamte Wohnfläche um bis zu 9% im Jahr 2030 ansteigt und eine Substitution alter durch neue Heizanlagen und damit eine Steigerung des Nutzungsgrades sowie eine Reduktion der mit Öl bzw. Kohle beheizten Wohnflächen sowie ein Zuwachs bei der Nutzung von Wärmepumpen erfolgt. Unter diesen Annahmen haben Kirchner et al. [67] festgestellt, dass von einer Reduktion des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor von 26% bis 2030 gegenüber 2005 ausgegangen werden kann.

Insgesamt zeigen alle drei Prognosen eine Abnahme des zukünftigen Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor. Es ist jedoch anzumerken, dass unterschiedliche Annahmen zur Erstellung dieser Prognosen verwendet wurden. Dies wirft die Frage nach der Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Modellannahmen auf, zum Beispiel, ob die Anzahl der Wohnungen auf 42,0 Mio. im Jahr 2030 zunehmen wird, oder ob die Wohnfläche um bis zu 9% im Jahr 2030 ausgeweitet wird.



**Abb. 5.24:** Vergleich des prognostizierten Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor bis 2030 mit dem TREM-Modell und verschiedenen Prognosen [65-67] mit den statistischen Daten des BMWi [64] bis 2014

Abb. 5.24 zeigt einen Vergleich zwischen der Prognose des TREM-Modells für den zukünftigen Endenergiebedarf im deutschen Wohnungssektor mit den Werten des BMWi [64] sowie den Prognosen von Fahl et al. [65], Hake et al. [66] und Kirchner et al. [67]. Die Ergebnisse für 2010-2014 zeigen, dass der Mittelwert der Prozentualen Differenz rund 6% beträgt, was eine deutliche Ähnlichkeit zwischen der mit dem TREM-Modell simulierten Entwicklung des Endenergiebedarfs und den bereits vorhandenen Daten des BMWi für den Endenergieverbrauch darstellt.

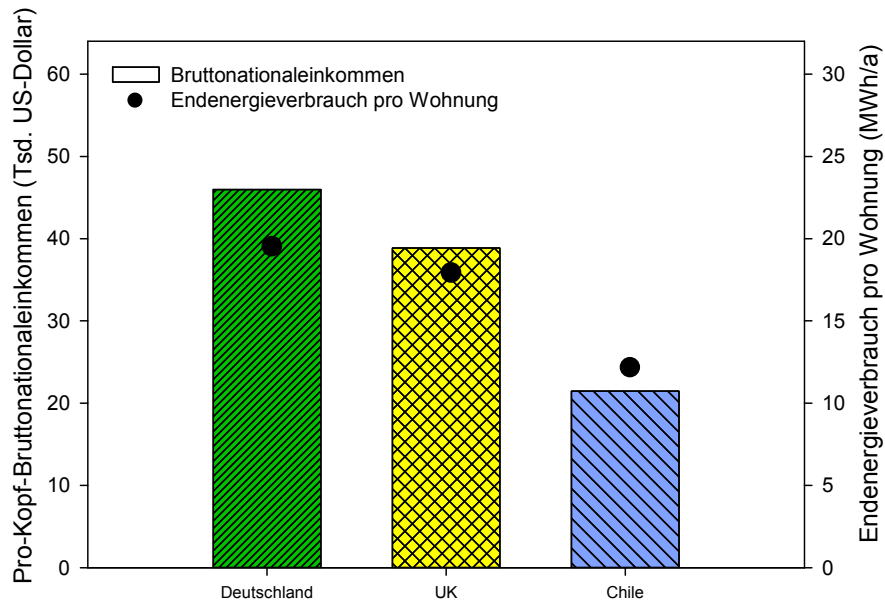
Aufgrund der geringen Wachstumsrate der Anzahl der Gebäude, der weiteren Verbesserung des Nutzungsgrades der Anlagen/Geräte und der Sanierung der alten Gebäude zeigen die Ergebnisse des TREM-Modells, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass der Endenergiebedarf im deutschen Wohnungssektor abnehmen wird. Die Prognosen von Fahl et

al. [65], Hake et al. [66] und Kirchner et al. [67] stimmen insofern mit den Ergebnisse des TREM-Modells überein. Allerdings fällt die Abnahme des Endenergiebedarfs nach den Prognosen des TREM-Modells geringer aus. Die Ergebnisse des TREM-Modells zeigen eine mittlere Reduktion des Endenergiebedarfs bis zum Jahr 2030 um etwa 9% im Vergleich zu 2010. Während die Reduktion bezogen auf 2010 bei Fahl et al. [65] bei 26% liegt, prognostizieren Hake et al. [66] und Kirchner et al. [67] eine Reduktion des Endenergiebedarfs um 11% bzw. 25%. Diese Werte liegen jedoch alle in den Wahrscheinlichkeitsbändern der Ergebnisse des TREM-Modells. Dies bedeutet, dass die in diesen Studien getroffenen Annahmen eine Kombination von Werten für die Eingangsparameter liefern, die im Rahmen der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Prinzipien als mögliche Entwicklung einzustufen sind, wenngleich die Prognosen von Fahl et al. [65] und Kirchner et al. [67] lediglich im 90% Konfidenzintervall des TREM-Modells liegen. Hierbei muss erwähnt werden, dass diese Prognosen nur zutreffen können, wenn die Annahmen der Szenarien tatsächlich in der Realität zur Anwendung kommen. Zum Beispiel nimmt die Prognose von Hake et al. [66] an, dass ab 2020 Maßnahmen zur Wärmedämmung für alle Altbauten umgesetzt werden, was sehr fraglich ist, weil die Umsetzung dieser Maßnahmen einen großen zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand mit sich bringt [225]. Außerdem benötigen, wie in Kapitel 3 gezeigt wurde, Energieeinsparmaßnahmen eine längere Zeit, um sichtbare Auswirkungen zu haben. In diesem Sinne könnte, wie vom TREM-Modell prognostiziert, eine leichte aber kontinuierliche Abnahme des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor bis 2030 realistisch sein.

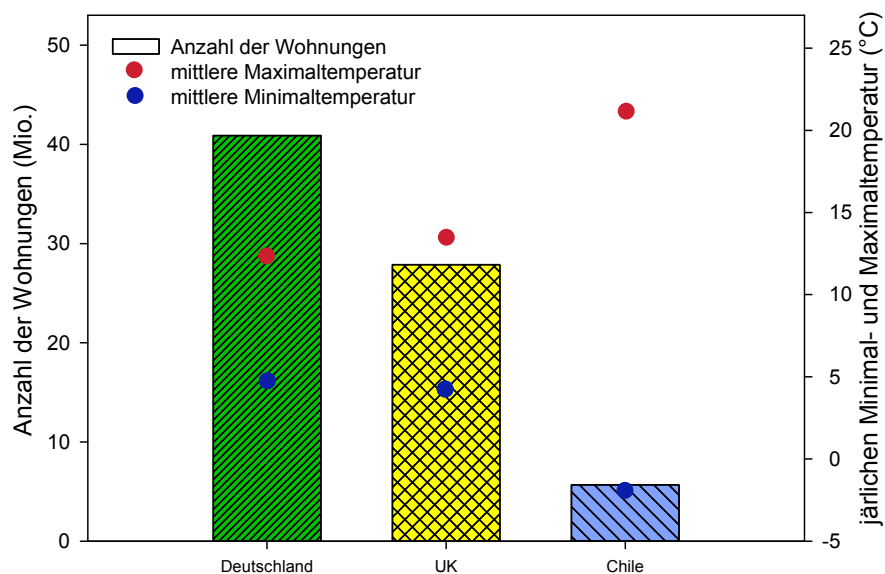
## 6 Überprüfung der Übertragbarkeit und Genauigkeit des Prognosemodells

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit und der Genauigkeit des in Kapitel 5 beschriebenen TREM-Modells wurde, wie dort bereits deutlich wurde, der Endenergiebedarf im Wohnungssektor von zwei weiteren Ländern simuliert: Chile und UK. Dies dient dazu, um festzustellen, ob der gewählte Modellierungsansatz tatsächlich für den Einsatz in verschiedenen Ländern geeignet ist und ob er Ergebnisse liefert, die langjährige statistische Daten hinreichend genau abbilden können. Chile und das UK wurden hierbei als Fallstudien betrachtet, da sich die sozialen, klimatischen, technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen in diesen beiden Ländern stark voneinander unterscheiden (s. Kapitel 2). Außerdem kann überprüft werden, ob das Modell in der Lage ist, genaue Ergebnisse sowohl für ein Land mit relativ ähnlichen Bedingungen wie Deutschland (in diesem Fall UK) als auch für ein Land mit sehr abweichenden Bedingungen von Deutschland (in diesem Fall Chile), zu liefern. Abb. 6.1 zeigt, dass der Endenergieverbrauch pro Wohnung in Deutschland mit 19,2 MWh/a ähnlich dem im UK mit 18,2 MWh/a ist. Allerdings ist die Anzahl der Wohnungen in Deutschland um 13 Mio. höher als im Vereinigten Königreich (Abb. 6.2). Dagegen differiert die Anzahl der Wohnungen zwischen Deutschland und Chile um mehr als 35 Mio., und auch der Endenergieverbrauch pro Wohnung ist mit einer Differenz über 7,3 MWh/a in Deutschland erheblich größer als in Chile (Abb. 6.1).

Abb. 6.1 zeigt in Bezug auf das Bruttonationaleinkommen pro Kopf eine ähnliche Situation wie beim Endenergieverbrauch pro Wohnung, und zwar ähnliche Werte des Bruttonationaleinkommens pro Kopf für die beiden Industrieländer mit 46.016 US\$ für Deutschland und 38.986 US\$ für UK aber einen bedeutenden Unterschied zwischen den Industrieländern und dem Schwellenland Chile mit 21.494 US\$ für Chile. Zusätzlich dazu zeigt Abb. 6.2, dass die durchschnittlichen jährlichen minimalen und maximalen Temperaturwerte in Deutschland und UK sehr ähnlich ausfallen, in Chile jedoch eine deutlich größere Amplitude als in Deutschland und UK aufweisen. Dies erklärt sich daraus, dass Chile mit einer Nord-Süd-Ausdehnung von 4.270 km über insgesamt 34,2 Breitengrade vielfältige Klimazonen umfasst. Im Vergleich dazu liegen das UK mit einer Ausdehnung über 8,7 Breitengrade und Deutschland über 7,5 Breitengrade bis auf einige wenige Ausnahmen aufgrund der Höhenlage in einer einzelnen Klimazone [271].



**Abb. 6.1:** Vergleich der durchschnittlichen Pro-Kopf-Bruttonationaleinkommens (Bezugsjahr 2013) und des durchschnittlichen Endenergieverbrauchs pro Wohnung in Deutschland, UK und Chile. Daten des Pro-Kopf-Bruttonationaleinkommens: [265]. Daten des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor basierend auf: [64, 129, 130]. Daten zur Anzahl der Wohnungen abgeleitet aus Datenquellen: [23, 135, 266]



**Abb. 6.2:** Vergleich der Anzahl der Wohnungen und der durchschnittlichen jährlichen Minimal- und Maximalwerte für die Außentemperatur. Daten zur Anzahl der Wohnungen abgeleitet aus Datenquellen: [23, 135, 266]. Daten der mittleren jährlichen Minimal- und Maximaltemperatur abgeleitet aus Datenquellen: [268-270]

Zur Bestimmung des Endenergiebedarfs beider Fallbeispiele (Chile und UK) mit Hilfe des TREM-Modells wurden zunächst die benötigten Daten gesammelt: Anzahl der Gebäude, Außentemperatur, Endenergiekennwerte pro Haus-Archetyp, Transmissionswärmeverluste der Bauteile und Nutzungsgrad der Anlagen. Hierbei war die Sammlung der benötigten Daten zur Anzahl der Gebäude und der Außentemperaturen für beide Länder leicht durchführbar. Weiterhin lagen sehr detaillierte Daten zu Energiekennwerten pro Haus-Archetyp für den Wohnungssektor im UK vor [19]. Für Chile standen die benötigten Daten ebenfalls zur Verfügung, allerdings erst ab dem Jahr 2010 [115, 263]. Da die Umfrage zur Sammlung von Daten der Energiekennwerte pro Haus-Archetyp in Chile erst ab dem Jahr 2008 durchgeführt wurde, wurden die Energiekennwerte durch die Extrapolation des Nutzungsgrads der Anlage/Geräte und der Anzahl der Gebäude auf das Jahr 2000 angepasst.

Somit ist festzuhalten, dass das erste Kriterium: „Verfügbarkeit der zur Modellierung benötigten Daten“ für die Übertragbarkeit des TREM-Modells erfüllt wurde. Ein Grund dafür ist, dass der optimierte Ansatz des TREM-Modells nur auf die maßgebenden Parameter Anzahl der Gebäude, Außenlufttemperatur, Endenergiekennwerte pro Haus-Archetyp, Transmissionswärmeverluste der Bauteile und den Nutzungsgrad der Anlagen fokussiert ist. Somit ist die benötigte Sammlung von Daten für eine Simulation relativ einfach zu realisieren. Tab. 6.1 zeigt eine Zusammenfassung der Datenquellen der Eingangsparameter für die Simulation mit dem TREM-Modell.

**Tab. 6.1:** Modelleingangsparameter mit den zugehörigen Datenquellen für die Simulation mit dem TREM-Modell in Chile und dem UK

Eingangsparameter	Chile	UK
Anzahl der Gebäude (Neubauten, Abriss, Ersatzbauten)	[266, 272, 273]	[135, 255]
Außentemperatur	[274]	[275]
Haus-Archetyp (Baujahr, nutzflächenspezifischer Wärmeverlust)	[115, 263, 274, 276-278]	[19]
Energiekennwerte nach Haus-Archetyp und Nutzungsbereichen	[115, 263]	[19]
Nutzungsgrad der Anlagen/Geräte	[263]	[19, 38]
tatsächlicher Endenergieverbrauch im Wohnungssektor (zum Vergleich mit den Ergebnissen der Simulation mit TREM)	[91]	[71, 109]

Auf Grundlage der gesammelten Daten wurde der Endenergieverbrauch von beiden Ländern (Chile und UK) für das Referenzjahr (2000) bestimmt und auf dieser Basis anschließend der Endenergiebedarf für den Prognosezeitraum (2001–2010) mit dem Modell prognostiziert. Dies erfolgte mit dem Berechnungsverfahren des TREM-Modells, das im Kapitel 5 erläutert wurde. Hierbei ist der gewählte Prognosezeitraum von 2001 bis 2010 identisch zu dem in Kapitel 4 verwendeten Zeitraum zur Überprüfung der Genauigkeit der Ergebnisse der bestehenden Energiemodelle für den Wohnungssektor.

Für die Bestimmung des Endenergiebedarfs in Chile wurde das ganze Land in sieben verschiedene Klimazonen unterteilt, da Chile durch sehr unterschiedliche Klimazonen charakterisiert ist. Die Unterteilung wurde hierbei entsprechend der chilenischen Norm NCh-1079 [103] (Zonificación climático habitacional para Chile) durchgeführt (Abb. 6.4). Da ein erklärtes Ziel dieser Norm die Charakterisierung klimatischer Rahmenbedingungen zur Berechnung des Endenergiebedarfs in Wohngebäuden ist, stellt sie eine gute Grundlage für die hier vorgenommene Modellierung dar.

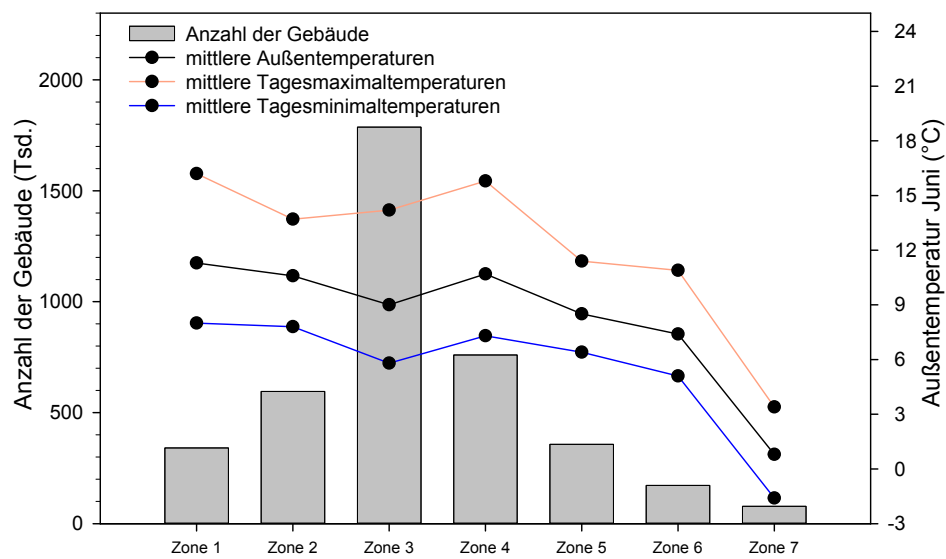
Im Nordteil Chiles (Klimazone 1) herrscht ein Wüstenklima vor mit einer jährlichen Temperaturschwankung zwischen 12°C und 40°C, während es im südlichen Teil Chiles durch das Klima Patagoniens (Klimazone 7) zu jährlichen Schwankungen der Temperatur zwischen -5°C und 25°C kommt. Alle anderen Klimazonen (2–6), weisen Temperaturen innerhalb der Temperaturbereiche dieser beiden Klimazonen (1 und 7) auf. Abb. 6.3 zeigt für alle Klimazonen die mittleren Temperaturen für den Monat Juni, welcher einer der kältesten Wintermonate in Chile ist [274].

Obwohl die niedrigsten Temperaturen in Klimazone 7 auftreten (Abb. 6.3), ist dieser Zone nicht der Hauptanteil des Endenergiebedarfs in Chile zuzuordnen, da dieser Teil des Landes wenig besiedelt ist. Auch die Klimazonen 1 und 2 sind kaum bewohnt. Die dichteste Besiedlung und damit die größte Anzahl an Gebäuden und demzufolge auch der höchste Endenergiebedarf im Wohnungssektor ist in den Klimazonen 3 und 4 zu finden wie Abb. 6.3 und Abb. 6.4 im Zusammenhang verdeutlichen. In diesen Zonen liegen auch die größten Städte des Landes: Santiago mit 1,7 Mio. Gebäuden und Concepción mit 0,7 Mio. Gebäuden. Insgesamt entfallen mehr als 60% des gesamten Gebäudebestands Chiles auf diese Gebiete [266].

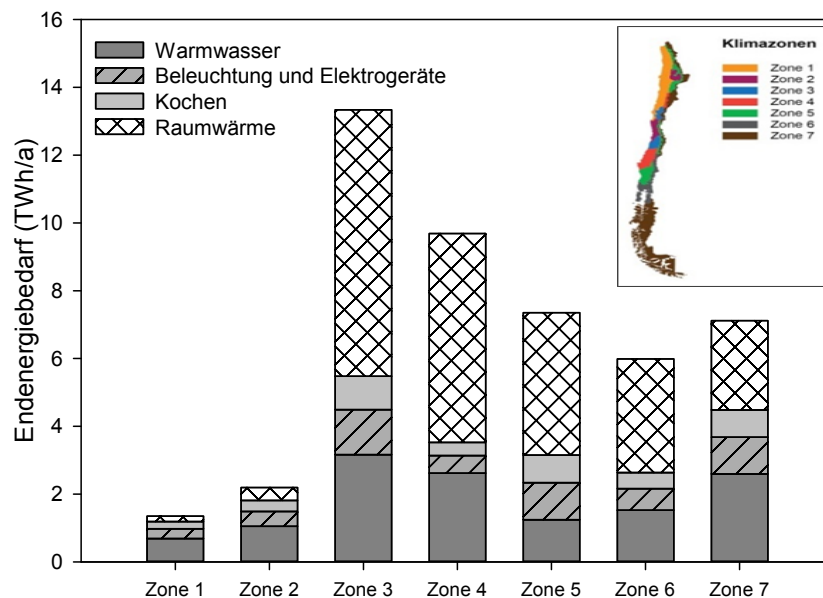
Wie zu erwarten ist, haben die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen einen direkten Einfluss auf den simulierten Endenergiebedarf. Die Ergebnisse des mit dem TREM-Modell berechneten durchschnittlichen monatlichen Endenergiebedarfs für das Jahr 2010 zeigen, dass der gesamte Endenergiebedarf im Wohnungssektor in Klimazone 1 (Abb. 6.5), insbesondere für Raumwärme vergleichsweise niedrig ist. Dagegen ist aus den bereits genannten Gründen der gesamte Endenergiebedarf im Wohnungssektor in Klimazone 7 (Abb. 6.6) deutlich höher als in Klimazone 1. In Klimazone 7 spielt der Endenergiebedarf für Raumwärme eine wichtige Rolle, insbesondere in den Wintermonaten Mai–September. In diesen Monaten beträgt der Endenergiebedarf für Raumwärme in dieser Klimazone bis zu 53% des gesamten Endenergiebedarfs (Juli).

Abb. 6.7 zeigt analog zu Abb. 5.21 den simulierten durchschnittlichen monatlichen Endenergiebedarf im gesamten chilenischen Wohnungssektor für das finale Jahr des Prognosezeitraums 2010. In den Wintermonaten (Juni–September) ist der Endenergiebedarf wesentlich höher als in den übrigen Monaten. Zu erklären ist dies damit, dass in den Wintermonaten die Außentemperatur im Durchschnitt deutlich unter 12°C liegt und damit die Verwendung eines Heizungssystems notwendig ist.

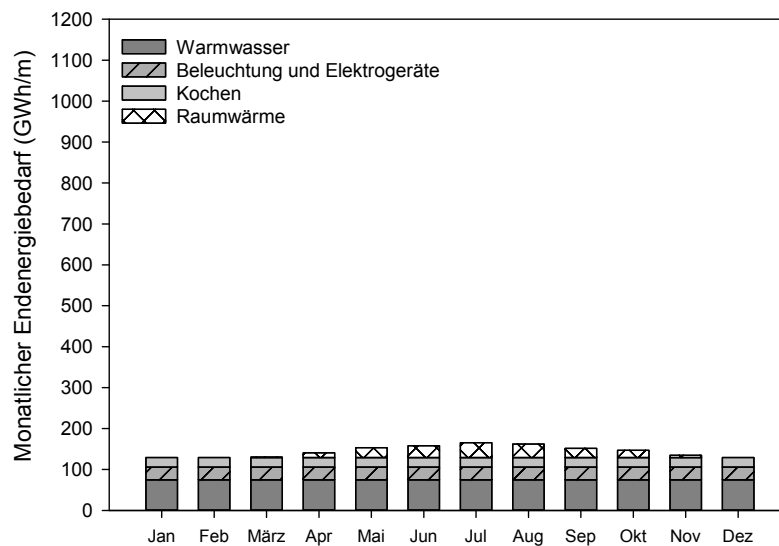




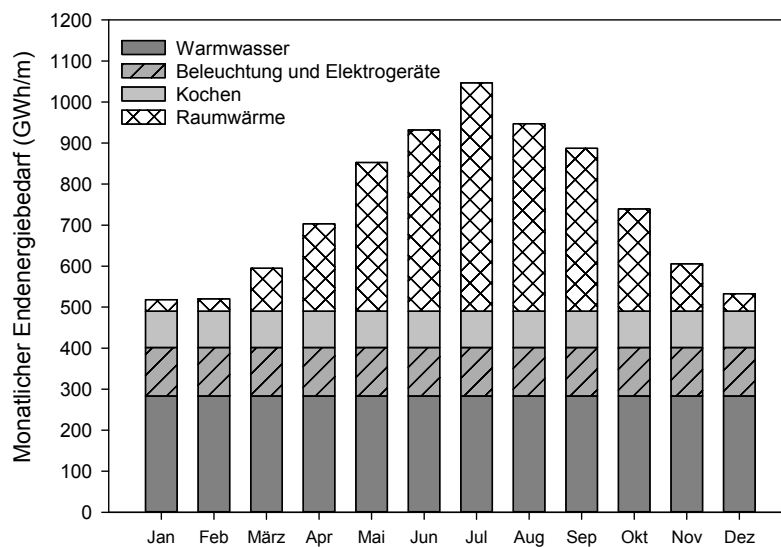
**Abb. 6.3:** Vergleich zwischen der Anzahl der Wohngebäude und der mittleren Außentemperatur im Juni (Referenzjahr 2000) nach Klimazonen in Chile. Datenquellen: [266, 274]



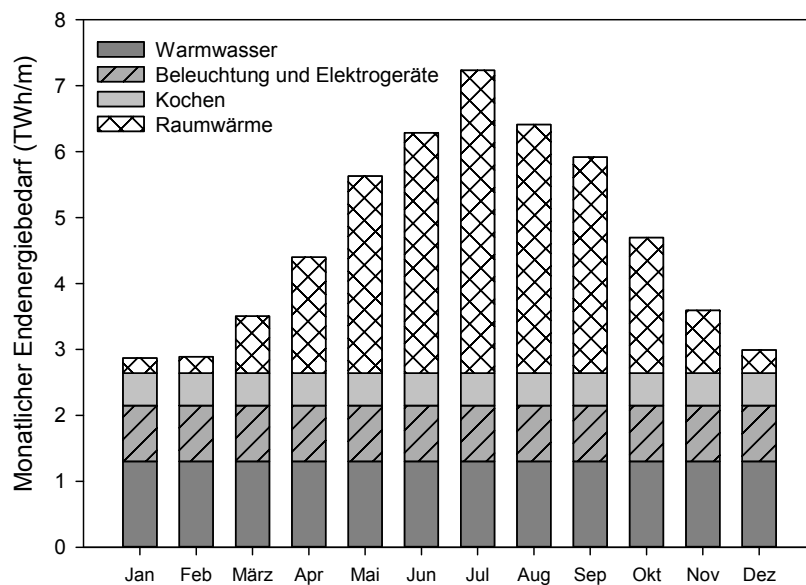
**Abb. 6.4:** Vergleich zwischen dem Endenergiebedarf im Wohnungssektor nach Klimazonen in Chile. Abgeleitet aus Datenquellen: [103, 263]



**Abb. 6.5:** Monatlicher Endenergiebedarf im chilenischen Wohnungssektor entsprechend der Simulation mit dem TREM-Modell für das zehnte Jahr der Prognose (2010) in Klimazone 1



**Abb. 6.6:** Monatlicher Endenergiebedarf im chilenischen Wohnungssektor entsprechend der Simulation mit dem TREM-Modell für das zehnte Jahr der Prognose (2010) in Klimazone 7

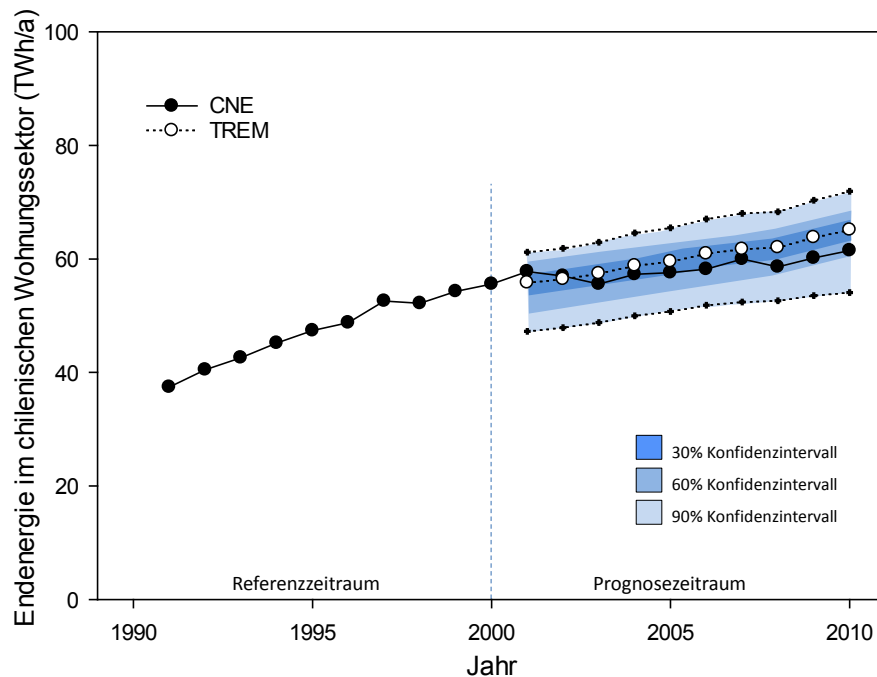


**Abb. 6.7:** Monatlicher Endenergiebedarf im gesamten chilenischen Wohnungssektor entsprechend der Simulation mit dem TREM-Modell für das zehnte Jahr der Prognose (2010)

Abb. 6.8 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs im chilenischen Wohnungssektor für den Prognosezeitraum. Hierbei ist zu sehen, dass der Endenergiebedarf im gesamten Prognosezeitraum eine steigende Tendenz aufweist. Dies kann auf die hohe jährliche Wachstumsrate für Neubauten in Chile zurückgeführt werden, welche im Zeitraum 1990–2000 zwischen 2% und 3% lag. Außerdem gab es bis zum Jahr 2000 noch kein Gesetz, welches den Energiebedarf für Neubauten limitierte. Für die Prognose wurde daher angenommen, dass keine Verbesserung der Baustandards stattgefunden hat.

Der Vergleich zwischen der durch die CNE (Comisión Nacional de Energía) [91] ermittelten und der mit dem TREM-Modell simulierten Entwicklung des Endenergiebedarfs im chilenischen Wohnungssektor in Abb. 6.8 zeigt, dass sich alle Werte des statistisch ermittelten Endenergieverbrauchs in den Wahrscheinlichkeitsbändern der Ergebnisse des TREM-Modells befinden. In Abb. 6.8 ist außerdem zu sehen, dass die prognostizierte Tendenz der Entwicklung des Endenergiebedarfs mit der zunehmenden Tendenz der Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach der CNE im Wesentlichen übereinstimmt. Dies kann bestätigt werden durch den Korrelationskoeffizienten, der mit  $r = 0,86$  eine sehr starke Ähnlichkeit zwischen den mit TREM modellierten und den statistischen Werten des Endenergiebedarfs zeigt (s. Bewertung in Tab. 4.1). Zusätzlich dazu ist anzumerken, dass die Differenz zwischen dem durchschnittlichen Endenergiebedarf der Simulation

mit TREM und dem vom CNE ermittelten Endenergieverbrauch für den gesamten Prognosezeitraum durchschnittlich 4% beträgt. Die größte Abweichung im Jahr 2010 weist einen Unterschied von 6% zwischen dem statistischen Endenergieverbrauch nach CNE im Vergleich zu dem nach TREM simulierten durchschnittlichen Endenergiebedarf auf.

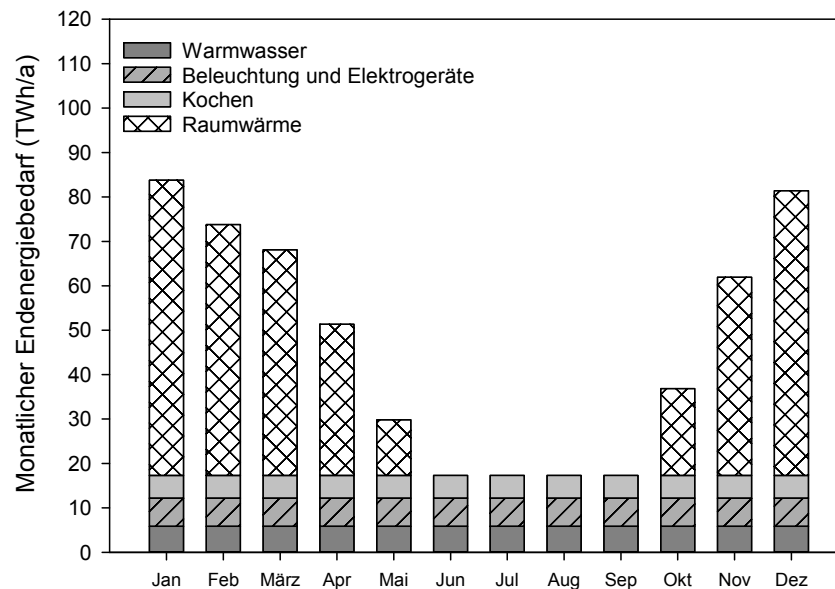


**Abb. 6.8:** Vergleich zwischen der von der CNE [91] ermittelten und der mit dem TREM-Modell simulierten Entwicklung des Endenergiebedarfs

Nach der Bestimmung des Endenergiebedarfs für den chilenischen Wohnungssektor wurde die Bestimmung des Endenergiebedarfs im britischen Wohnungssektor durchgeführt. Hierbei wurde das ganze Land als eine einzige Klimazone betrachtet, da die mittlere Außentemperatur im gesamten Vereinigten Königreich (UK) keine großen Unterschiede aufweist [275].

Der mit dem TREM-Modell für das Jahr 2010 prognostizierte Endenergiebedarf im britischen Wohnungssektor in Abb. 6.9 zeigt, dass der durchschnittliche monatliche Endenergiebedarf im UK eine große Ähnlichkeit mit dem durchschnittlichen monatlichen Endenergiebedarf im deutschen Wohnungssektor (s. Abb. 5.21) aufweist. Das heißt, es gibt einen hohen Endenergiebedarf in den Wintermonaten (Dezember–März) im Vergleich zu den Sommermonaten (Juni–August) (Abb. 6.9). Der Endenergiebedarf für Raumwärme ist in den Sommermonaten für das UK sehr niedrig, während auf die Wintermonate mehr als die Hälfte des gesamten Endenergiebedarfs entfällt. Des Weiteren nimmt der Endenergiebedarf im Prognosezeitraum (s. Abb. 6.10) ebenfalls wie in Deutschland leicht ab. Ursache

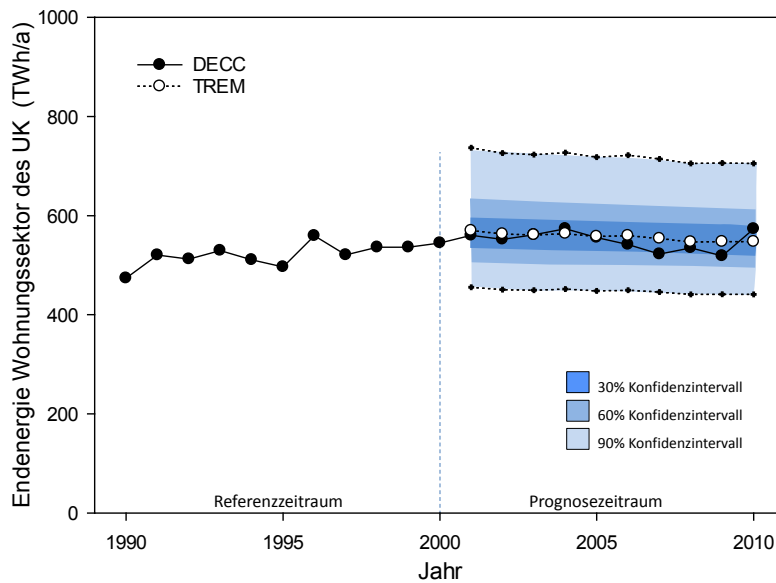
hierfür sind Neubauten, die jedoch mit einer jährlichen Wachstumsrate von unter 1% nur einen geringen Zuwachs aufweisen [135, 255], und gebäudetechnische Faktoren wie die kontinuierliche Verbesserung des Nutzungsgrades der verwendeten Anlagen/Geräte und die Verbesserung der Gebäudedämmung [19, 38].



**Abb. 6.9:** Monatlicher Endenergiebedarf im britischen Wohnungssektor entsprechend der Simulation mit dem TREM-Modell für das zehnte Jahr der Prognose (2010)

Beim Vergleich der mit dem TREM-Modell ermittelten Ergebnisse für den Endenergiebedarf im britischen Wohnungssektor mit den statistischen Daten vom DECC (Department of Energy and Climate Change) [71, 109] im Prognosezeitraum, wurde ein relativer Abweichungsfehler von bis zu 6% erhalten. Im gesamten Prognosezeitraum (2001–2010) betrug der Mittelwert der prozentualen Differenz (MPD) 2%. Außerdem ist in Abb. 6.10 zu sehen, dass die prognostizierte Tendenz der Entwicklung des Endenergiebedarfs im UK mit der sinkenden Tendenz in der Entwicklung des tatsächlichen Endenergieverbrauchs prinzipiell übereinstimmt. Allerdings ist gemäß dem Bewertungsschema von Tab. 4.1 mit einem Korrelationskoeffizient  $r = 0,5$  nur eine mäßige Ähnlichkeit zwischen den mit dem TREM-Modell modellierten und den statistischen Werten für den Endenergiebedarf zu verzeichnen.

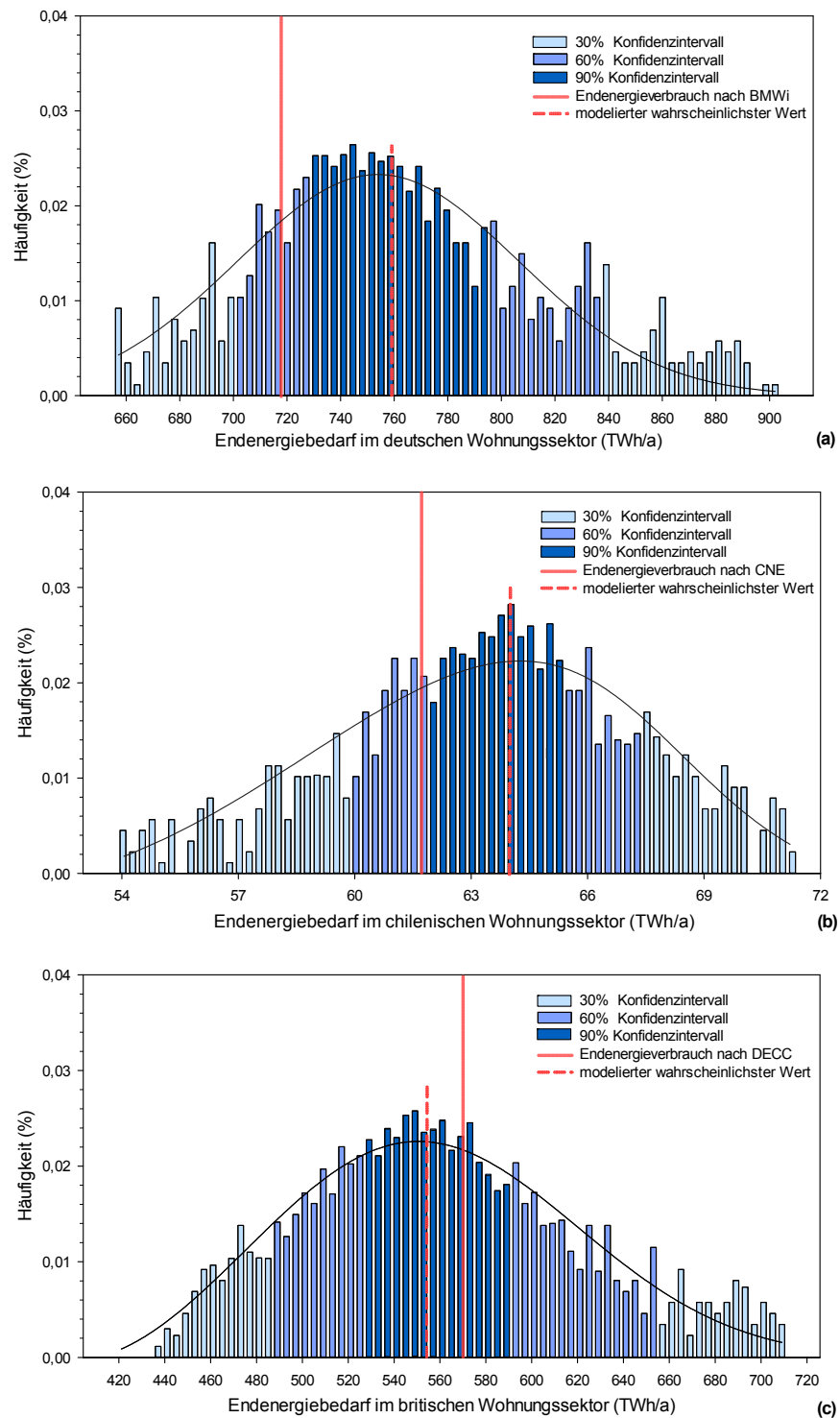
Es ist hervorzuheben, dass in der Modellierung mit dem TREM-Modell die wahrscheinlichsten Schwankungen des Endenergiebedarfs in Relation zu möglichen Variationen der Eingangsparameter mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen betrachtet werden. Dies impliziert, dass die Ergebnisse für den Endenergiebedarf nicht als einzelne jährliche Werte betrachtet werden sollten, sondern als wahrscheinliche



**Abb. 6.10:** Vergleich zwischen der vom DECC [71, 109] ermittelten und der mit dem TREM-Modell simulierten Entwicklung des Endenergiebedarfs

Werte auf einem Wahrscheinlichkeitsband mit den drei Konfidenzintervallen 30%, 60% und 90%. Als Beispiel für Wahrscheinlichkeitsbänder werden in Abb. 6.11 Häufigkeitsverteilungen des prognostizierten Endenergiebedarfs im finalen Prognosejahr 2010 für die drei untersuchten Länder (Deutschland, UK und Chile) dargestellt. Hierbei ist zu sehen, dass alle Werte des statistischen Endenergieverbrauchs sich innerhalb der Wahrscheinlichkeitsbänder der Ergebnisse des TREM-Modells befinden. Außerdem ist zu erkennen, dass die unteren Grenzen der Wahrscheinlichkeitsbänder der drei Länder mit  $-14\%$ ,  $-16\%$  und  $-20\%$  für die 90%igen Konfidenzintervalle für Deutschland, bzw. Chile und UK eine ähnliche Differenz zum modellierten Mittelwert des Endenergiebedarfs aufweisen. Dies gilt jedoch nicht für die oberen Grenzen der Wahrscheinlichkeitsbänder, welche bei  $+18\%$ ,  $+11\%$   $+29\%$  für die 90%igen Konfidenzintervalle für die jeweiligen Länder (Deutschland, Chile und UK) liegen. Die Ergebnisse für die absoluten Unterschiede der Wahrscheinlichkeitsbänder für die 90%igen Konfidenzintervalle für den Endenergiebedarf im Prognosezeitraum (2001–2010) im Vergleich zum modellierten Mittelwert sind in Tab. 6.2 dargestellt.

Der Grund für die festgestellten Unterschiede in der Breite der Konfidenzintervalle sind die verwendeten Daten für die Eingangsparameter aus dem Referenzzeitraum. In Deutschland und dem UK wurden in der Modellierung zum einen die steigende Tendenz in der Anzahl der Gebäude aufgrund der positiven Wachstumsrate betrachtet und zum anderen



**Abb. 6.11:** Vergleich zwischen dem statistisch ermittelten nationalen Endenergieverbrauch und den mit dem TREM-Modell erstellten Wahrscheinlichkeitsbändern des Endenergiebedarfs im finalen Jahr der Prognose (2010) für Deutschland (a), Chile (b) und UK (c). Datenquellen: BMWi [64], CNE [91] und DECC [71, 109]

die fallende Tendenz beim Endenergieverbrauch für Raumwärme aufgrund der Sanierung von Bestandsgebäuden und der Verbesserung des Nutzungsgrades von Heizungsanlagen berücksichtigt. Diese beiden gegenläufigen Tendenzen führen letztendlich zu einer Verbreiterung des Wahrscheinlichkeitsbandes der Prognose des Endenergiebedarfs. Außerdem ist zu beobachten, dass das Wahrscheinlichkeitsband der Ergebnisse des Endenergiebedarfs im britischen Wohnungssektor breiter ist als das des deutschen Wohnungssektors. Dies liegt daran, dass die Temperaturschwankungen in den kältesten Monaten (November, Dezember, Januar, Februar) im UK (durchschnittliche Standardabweichung = 4) höher sind als in Deutschland (durchschnittliche Standardabweichung = 2).

Im Fallbeispiel Chile dagegen weisen sowohl der Endenergiebedarf pro Wohnung als auch die Anzahl der Gebäude eine steigende Tendenz auf; somit wird ein schmales Wahrscheinlichkeitsband gebildet.

Aus Tab. 6.2 wird zudem die Größe des Gebäudebestandes bzw. die Höhe des gesamten Endenergiebedarfs in den verschiedenen Ländern deutlich. Eine 1%ige Variation des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor entspricht 5,5 TWh/a, dagegen entspricht diese im chilenischen Wohnungssektor 0,6 TWh/a.

**Tab. 6.2:** Absolute Differenz des errechneten 90%igen Konfidenzintervalls zu den mit dem TREM-Modell modellierten Mittelwerten des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor für Deutschland, Chile und das UK

Jahr der Modellierung	Absolute (relative) Differenz des unteren 90%-igen Konfidenzintervalls (TWh/a)			Absolute (relative) Differenz des oberen 90%-igen Konfidenzintervalls (TWh/a)		
	Jahr 1: 2001	Jahr 5: 2005	Jahr 10: 2010	Jahr 1: 2001	Jahr 5: 2005	Jahr 10: 2010
Deutschland	-98 (-13%)	-101 (-13%)	-104 (-14%)	106 (14%)	121 (16%)	139 (18%)
Chile	-9 (-14%)	-9 (-14%)	-11 (-16%)	5 (8%)	6 (9%)	7 (11%)
UK	-114 (-20%)	-115 (-20%)	-115 (-20%)	167 (29%)	160 (29%)	158 (29%)

Ein Vergleich zwischen den Prognoseergebnissen des TREM-Modells für Deutschland, UK und Chile und den statistischen Daten des Endenergieverbrauchs der drei Länder wird in Tab. 6.3 dargestellt. Tab. 6.3 zeigt, dass das Modell zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor im „Prognosezeitraum“ sehr genaue Ergebnisse liefert mit Mittelwerten der prozentualen Differenz von zwischen 2% und 5%. Außerdem korrelieren die simulierten Ergebnisse des TREM-Modells mit dem statistischen Endenergieverbrauch mit einer „mäßigen“ bis „sehr starken“ Ähnlichkeit (s. Definition in Tab. 4.1).



**Tab. 6.3:** Ergebnisse für die Genauigkeit des TREM-Modells für die Bestimmung des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor verschiedener Länder entsprechend den im Abschnitt 4.1. definierten Parametern

	Deutschland	Chile	UK
Relativer Abweichungsfehler (%)	≤18	≤6	≤6
Mittelwert der prozentualen Differenz (%)	5	4	2
Korrelationskoeffizient $r$	0,35	0,86	0,50
Bestimmtheitsmaß $r^2$	0,12	0,74	0,25

Der Grund für die Unterschiede des Korrelationskoeffizienten der Ergebnisse des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor der drei Länder (Deutschland, UK, Chile) sind die unterschiedlich großen Schwankungen des Energiebedarfs im Laufe der Jahre. Je größer die Schwankungen des Endenergieverbrauchs sind, desto kleiner wird die Kovarianz und es ergibt sich lediglich eine schwache Korrelation (Gleichung 4.2). Beim Fallbeispiel Deutschland liegen die Schwankungen des Endenergieverbrauchs im Prognosezeitraum bei bis zu 16%, während sie in UK bis zu 9% und im Fallbeispiel Chile nur bis zu 3% betragen. Dieselbe Konstellation spiegelt sich in den Korrelationskoeffizienten wider. Allerdings muss beachtet werden, dass die Ergebnisse der Genauigkeit des TREM-Modells nur anhand der Methodik, welche in Abschnitt 4.1 dargestellt wurde, überprüft wurden. Das heißt, es wurde nur der Wert des Wahrscheinlichkeitsbands von TREM, welcher am wahrscheinlichsten ist, mit dem statistischen Energieverbrauch verglichen. Wenn die mit dem TREM-Modell erstellten Wahrscheinlichkeitsbänder betrachtet werden, so kann festgestellt werden, dass sich alle Werte des tatsächlichen Endenergieverbrauchs der drei Länder (bis auf das Ausreißer-Jahr 2007 für Deutschland) in dem 60%-Konfidenzintervall der Wahrscheinlichkeitsbänder der Ergebnisse des TREM-Modells befinden.

Die Resultate der Überprüfung der Übertragbarkeit des TREM-Modells zeigen, dass das optimierte Modell sehr gut geeignet ist, ohne zusätzliche Anpassungen eine Prognose der Entwicklung des zukünftigen Endenergiebedarfs im Wohnungssektor für unterschiedliche Länder zu erstellen. Dies ist auf die Fokussierung des optimierten Modells auf die einflussreichsten Parameter (Anzahl von Gebäuden, Innentemperatur, Außentemperatur, Transmissionswärmeverlust und Nutzungsgrad der Anlagen) zurückzuführen. Damit wird eine hohe Genauigkeit der Modellergebnisse erreicht und zudem eine gute Verfügbarkeit

der notwendigen Daten gewährleisten. Für eine abschließende Verifizierung sind darüber hinaus allerdings Überprüfungen mit den Eingangsdaten weiterer Länder erforderlich.

Die Ergebnisse der Genauigkeit des optimierten Modells zeigen, dass das Modell nicht nur jährliche Werte für den Endenergiebedarf mit einer hohen Genauigkeit prognostizieren kann ( $\text{MPD} < 5\%$ ), sondern auch den wahrscheinlichsten Trend in der Entwicklung des Endenergiebedarfs, sowohl abnehmend als auch zunehmend, bestimmen kann ( $r > 0,35$ ). Dies setzt das Modell deutlich von vielen bestehenden Modellen ab (s. Abschnitt 4.2). Außerdem weist das optimierte Modell eine neue Philosophie auf: die Quantifizierung der Unsicherheit der Ergebnisse mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen ermöglicht die Bestimmung der wahrscheinlichsten Schwankungen des Endenergiebedarfs aufgrund der Unsicherheit der Rahmenbedingungen (Eingangsparameter wie Klima oder Gebäudebestand). Daher kann das optimierte Modell (TREM) als ein Beitrag zum Fortschritt in der Prognose des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor angesehen werden.

## 7 Schlussfolgerungen

In den letzten Jahrzehnten wurden eine Reihe verschiedener Prognosemodelle für den Wohnungssektor entwickelt. Diese Modelle tragen nicht nur zur Bestimmung des aktuellen Endenergieverbrauchs und zur Prognose des zukünftigen Endenergiebedarfs bei, sondern sind auch ein hilfreiches Werkzeug, um Auswirkungen von zukünftigen Energieeinsparmaßnahmen zu beurteilen. Außerdem ermöglichen sie die Identifizierung der wichtigsten Einflussfaktoren auf den Endenergieverbrauch. Die derzeit bestehenden Modelle wurden größtenteils für ein spezifisches Land unter einer speziellen Aufgabenstellung entwickelt. Eine Übertragbarkeit der Modelle auf andere Länder wurde bisher noch nicht überprüft. Außerdem gibt es Unsicherheiten der Ergebnisse aufgrund der inhärenten Unsicherheiten in den Eingangsparametern, deren Einflussgrad bisher nur für einige wenige Modelle untersucht wurde.

In dieser Arbeit wurden die Übertragbarkeit, Genauigkeit und Unsicherheit von zwölf Bottom-Up Modellen, die entweder auf Basis statistischer Prinzipien oder auch auf Grundlage von bauphysikalischen Zusammenhängen funktionieren, untersucht. Hierbei handelt es sich um die Modelle: MAED-2 [9], FfE-Gebäudemodell [16], CDEM [62], REM [15], CREEM [18], ECCABS [21, 22], REEPS [176], BREHOMES [20], LEAP [10], BSM [27], DECM [24] und CHM [19]. Der deutsche Wohnungssektor diente bei diesen Untersuchungen als Fallbeispiel. Außerdem wurde eine Sensitivitätsanalyse für jene Modelle durchgeführt, die als übertragbar klassifiziert wurden.

Von den zwölf untersuchten Modellen waren vier Modelle (CREEM, DECM, CHM, und REEPS) nicht übertragbar, da diese Modelle Kernrechner (HOT2000 [40], SAP-2005 [178], SAP-2009 [180] und DOE-2 [49]) verwenden, die es nicht ermöglichen, Klimadaten anderer Länder zu verwenden, sondern nur für das Land, für das sie entwickelt wurden. Zudem wurde das Modell DOE-2 als nur bedingt übertragbar eingestuft, da Gebäudedaten zur Länge, Breite und Orientierung von repräsentativen Gebäuden benötigt werden. Für die repräsentativen Gebäude des deutschen Gebäudebestandes [16, 17, 27, 41] stehen diese jedoch nicht zur Verfügung.

Es wurde außerdem gezeigt, dass Modelle mit einem hohen Detaillierungsgrad, das heißt hauptsächlich die bauphysikalischen Modelle, große Mengen an Daten benötigen, die einen sehr hohen Modellierungsaufwand zur Folge haben. Diese Modelle ermöglichen jedoch eine detaillierte Analyse, wie sich Energieeinsparmaßnahmen in der Zukunft auswirken könnten, da z.B. die Begrenzung des Jahresheizwärmebedarfs durch die bessere Dämmung

von Außenwänden und Fenstern sowie die Nutzung effizienter Heizungsanlagen im Modell abgebildet werden können.

Für die Überprüfung der Genauigkeit der Modellergebnisse der acht übertragbaren Modelle wurden zwei Untersuchungszeiträume betrachtet: ein „Referenzzeitraum“ von 1990 bis 2000 und ein „Prognosezeitraum“ von 2001 bis 2010. Für alle Modellierungen konnten statistische Daten aus dem „Referenzzeitraum“ verwendet werden, um den Endenergieverbrauch zu ermitteln. Im „Prognosezeitraum“ wurde mittels der Berechnungsmethoden des jeweils verwendeten Modells der Endenergiebedarf prognostiziert. Bezüglich der Genauigkeit der Modellergebnisse, konnte festgestellt werden, dass es keinen bedeutenden Unterschied zwischen den bauphysikalischen und den statistischen Modellen gibt. Die bauphysikalischen Modelle weisen im Durchschnitt einen Mittelwert der prozentualen Differenz von 8% im Referenzzeitraum und von 6% im Prognosezeitraum auf. Die Ergebnisse der statistischen Modelle hingegen liegen bei 7% im Referenzzeitraum und bei 10% im Prognosezeitraum.

Obwohl beide Modellarten ähnliche genaue Ergebnisse liefern können, ist zu beachten, dass die Genauigkeit der Ergebnisse der statistischen Modelle noch stärker von der Qualität der Datenbasis für die Eingangsparameter abhängt, als dies bei den bauphysikalischen Modellen der Fall ist. Dies gilt insbesondere für Daten, die mit dem spezifischen Endenergieverbrauch für Raumwärme und der Bereitstellung von Warmwasser in Verbindung stehen, da diese neben der Anzahl der Wohnungen die einflussreichsten Eingangsparameter auf den Endenergiebedarf im Wohnungssektor darstellen (Tab. 4.6) und damit einen bedeutenden Einfluss auf die Modellergebnisse ausüben. Aus diesem Grund liefern die statistischen Modelle nur dann ebenso genaue Ergebnisse wie die bauphysikalischen Modelle, wenn repräsentative Umfragen zum spezifischen Endenergieverbrauch in ausreichender Qualität vorliegen [279]. Im Falle Deutschlands scheinen die Umfragen, die vom IWU [17, 41] und der DENA [210] durchgeführt wurden, daher eine verlässliche Datengrundlage zu sein, da die Ergebnisse der statistischen Modelle bei einem Mittelwert von 7% im Referenzzeitraum liegen. Außerdem wurde gezeigt, dass die Verwendung von Trendvorhersagen bei statistischen Modellen eine Fehlerquelle für die Prognose des zukünftigen Endenergiebedarfs darstellen kann, vor allem dann, wenn imminente Möglichkeiten zur Veränderung der bisherigen Trends vorliegen. Beispielsweise wiesen in der ersten Simulation mit LEAP die einflussreichsten Eingangsparameter des Modells, die Anzahl der Wohnungen und der durchschnittliche Raumwärmeverbrauch, Veränderungen in ihrer Tendenz auf. Während der Zuwachs an Wohnungen bis zum Jahr 2000 sehr linear mit einer durchschnittlichen Anstiegsrate von 1,3% verlaufen ist, sank die Rate in den Jahren von 2001 bis 2010 auf 0,5% [149]. Ebenfalls hat sich der Verlauf des durchschnittlichen Raumwärmeverbrauchs

ab dem Jahr 2001 deutlich verändert (s. Abschnitt 2.3). Dies führte letztendlich zu einer bedeutenden Abweichung zwischen dem vom BMWi ermittelten Endenergieverbrauch und dem von LEAP berechneten Endenergiebedarf (Mittelwert der prozentualen Differenz von 27%).

Der Endenergieverbrauch im Wohnungssektor wird grundsätzlich stark durch die Anzahl der Wohnungen/Gebäude sowie deren Endenergieverbrauch für Raumwärme beeinflusst. So stieg die Anzahl an Wohnungen in Deutschland im Referenzzeitraum (1990–2000) an, was insgesamt zu einem Anstieg des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor geführt hat.

Allerdings wäre aufgrund des Einflusses von Gesetzen zur Verbesserung der Gebäudedämmung (in Westdeutschland ab 1977 und in Ostdeutschland ab 1976) und zur Nutzung effizienterer Boiler (ab 1978 in Westdeutschland) [280], sowie auch aufgrund von Sanierung und Ersatz von Gebäuden, trotz steigender Anzahl der Wohnungen, ein leichter Rückgang des Endenergieverbrauchs zu erwarten gewesen. Eine rückläufige Tendenz des Endenergieverbrauchs ist in Deutschland jedoch erst ab 2001 zu verzeichnen [64], einhergehend mit einer rückläufigen Wachstumsrate in der Anzahl der Wohnungen zwischen den Jahren 2001 und 2010 von um 0,8%.

Es stellt sich daher die Frage, inwiefern Energieeinsparmaßnahmen zu merklichen Auswirkungen führen können im Hinblick auf einen wechselseitigen Bezug mit anderen Parametern, z.B. der steigenden Wohnungsanzahl. Dieser Aspekt wurde bisher noch nicht diskutiert und stellt daher einen Forschungsbedarf dar. Die Kategorisierung der Eingangsparameter und die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse können hierbei eine wichtige Rolle spielen. Wie in Kapitel 4 gezeigt wurde, ist es möglich, die von einer bestimmten Kombination von Eingangsparametern induzierten Auswirkungen auf den Endenergiebedarf abzuschätzen, wenn der Einflussgrad jedes einzelnen Eingangsparameters bekannt ist.

Durch eine Sensitivitätsanalyse konnten die einflussreichsten Eingangsparameter für den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnsektor ermittelt werden [281]. Dies sind mit abnehmendem Einfluss: die Anzahl der Wohnungen/Gebäude und der spezifische Endenergieverbrauch für Raumwärme, Warmwasserversorgung, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung. Zudem wurde herausgestellt, dass die normalisierten Sensitivitätskoeffizienten vom Aufschlüsselungsgrad der Eingangsparameter abhängen. So besitzt der übergeordnete Eingangsparameter „Spezifischer Energieverbrauch für Raumwärme“ in einem Modell mit niedrigem Detaillierungsgrad einen größeren normalisierten Sensitivitätskoeffizienten (durchschnittlich  $S_{i,j} = 1,0$  für alle Modelle) als die Eingangsparameter, die diesen bestimmen und beeinflussen, wie „Nutzungsgrad der Heizungsanlage“ und „Luftwechselrate“

(durchschnittlich  $S_{i,j} = -0,8$  und  $S_{i,j} = 0,46$  für alle Modelle), die in Modellen mit höherem Detaillierungsgrad verwendet werden. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse am Fallbeispiel Deutschland zeigen nach dem Aufschließen der Eingangsparameter, dass die einflussreichsten Parameter die Anzahl der Wohnungen  $S_{i,j} = 1,5$ , sowie die Personen pro Wohnung/Wohnfläche  $S_{i,j} = 1,9$  und die Bevölkerungsentwicklung  $S_{i,j} = 2,01$  sind. Diese Parameter sind jedoch nur schwer oder gar nicht durch politische Energieeinsparmaßnahmen beeinflussbar. Insgesamt gibt es nur eine begrenzte Anzahl an Eingangsparametern, welche durch Energieeinsparmaßnahmen beeinflussbar sind, z.B. den Nutzungsgrad der verwendeten Anlage/Geräte  $S_{i,j} = -0,8$  oder eine Verbesserung der Wärmedämmung von Außenwänden aller Gebäude (Verringerung der U-Werte)  $S_{i,j} = 0,45$ . Hierbei würde eine 1%ige Verbesserung des Nutzungsgrades der Heizanlage eine Reduktion von 0,8% auf den Endenergieverbrauch bewirken. Ebenfalls ergibt eine 1%ige Verringerung der U-Werte der Außenwände aller Gebäude eine 0,45%ige Reduktion des Endenergieverbrauchs.

Außerdem wurde festgestellt, dass der Einflussgrad der einzelnen Eingangsparameter jeweils vom Detaillierungsgrad des verwendeten Modells zur Bestimmung des Endenergiebedarfs und den spezifischen Bedingungen des zu untersuchenden Landes abhängt, wie dem Klima. Werden also weitere Länder untersucht, ist es notwendig, weitere Sensitivitätsanalysen durchzuführen, die deren spezifische Bedingungen (Gebäudebestand, Lebensstandard, Klima) berücksichtigen und den jeweiligen Detaillierungsgrad des verwendeten Modells beinhalten. In diesem Sinne ist eine Multimodell-Analyse zu empfehlen, insbesondere zum besseren Verständnis des Einflussgrades der Eingangsparameter auf den Endenergiebedarf des jeweiligen Landes und zur Entwicklung von wirksamen Energieeinsparmaßnahmen.

Weiterhin konnte herausgestellt werden, dass die untersuchten statistischen Modelle empfindlicher auf Veränderungen der Eingangsparameter reagieren als die bauphysikalischen Modelle. Dies impliziert, dass die Ergebnisse der statistischen Modelle durch ihre Vereinfachungen und ihre Begrenzung an Eingangsparametern einen größeren Grad an Unsicherheit mit sich bringen. Da die Unsicherheit und die möglichen Interaktionen der einzelnen Eingangsparameter durch eine Sensitivitätsanalyse nicht bestimmt werden können, wurde daher eine Unsicherheitsanalyse auf Grundlage einer Monte-Carlo-Simulation durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Unsicherheitsanalyse zeigen, dass es große Unsicherheiten in der Prognose des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor gibt. Im ersten Jahr der Prognose liegt die obere und untere Grenze des 90%igen Konfidenzintervalls der Wahrscheinlichkeitsbänder für das Fallbeispiel Deutschland zwischen durchschnittlich  $-11\%$  und  $+9\%$  in Relation zum berechneten Mittelwert für jedes einzelne untersuchte Modell. Für das

letzte Jahr der Prognose, in diesem Fall das Jahr 2010, steigt jedoch diese Grenze auf  $-15\%$  bzw.  $+12\%$ . Außerdem wurde beobachtet, dass die Modelle mit einem geringeren Detaillierungsgrad Wahrscheinlichkeitsbänder besitzen, die im Laufe der Zeit eine Trapezform bilden. Dagegen weisen die Wahrscheinlichkeitsbänder der Modelle mit einem höheren Detaillierungsgrad eine mehr oder weniger parallele Form mit relativ konstanten Werten für die oberen und unteren Grenzen der Wahrscheinlichkeitsbänder auf. Daraus kann geschlossen werden, dass die Unsicherheit der Eingangsparameter im Laufe der Zeit einen größeren Einfluss auf die Modelle mit geringem Detaillierungsgrad als auf die Modelle mit hohem Detaillierungsgrad ausübt. Dies wird durch die Wahrscheinlichkeitsbänder des CDEM-Modells (das Modell mit dem höchsten Detaillierungsgrad) bestätigt, welches schmale Wahrscheinlichkeitsbänder für die gesamte Entwicklung des Endenergiebedarfs zeigt.

Basierend auf diesen Ergebnissen der Unsicherheitsanalyse kann festgestellt werden, dass die Unsicherheiten der Ergebnisse einer Modellierung in direkter Verbindung mit dem Detaillierungsgrad des Modells stehen. Je höher der Detaillierungsgrad eines Modells ist, desto niedriger werden die Unsicherheiten der Ergebnisse sein. Da durch Modelle mit höherem Detaillierungsgrad jedoch nur ein sehr schmales Band von wahrscheinlichen Werten abgebildet wird, ist es schwierig bis unmöglich, außergewöhnlich große jährliche Veränderungen abzubilden. Mit dem Modell MAED-2 war es beispielsweise nicht möglich, die Verringerung des Endenergieverbrauchs im Jahr 2007 aufgrund der erheblichen Abnahme der Gradtagzahlen in diesem Jahr zu prognostizieren. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, einen optimalen Bereich von wahrscheinlichen Werten zu bestimmen, der nicht nur einen genauen Trend abbildet, sondern es auch ermöglicht, jährliche Schwankungen sichtbar zu machen, ohne aber Ausreißerjahre korrekt abbilden zu müssen.

Als letzter Schritt dieser Arbeit wurden auf der Grundlage der gewonnen Erkenntnisse ausgewählte Algorithmen der bestehenden Modelle zu einem übertragbaren Modell (Transferable Residential Energy Model, TREM) weiterentwickelt. Dieses Modell ermöglicht die Bestimmung des zukünftigen Endenergiebedarfs im Wohnungssektor eines beliebigen Landes nach Nutzungsbereichen (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung). Das Modell verwendet hierbei statistische Daten des Gebäudebestandes und Energieverbrauchs sowie Monte-Carlo-Simulationen.

Anhand der Daten zweier Industrieländer (Deutschland, UK) und eines Schwellenlandes (Chile) wurden die Übertragbarkeit und Genauigkeit des TREM-Modells überprüft. Es wurde festgestellt, dass das Modell in der Lage ist, den Endenergiebedarf in verschiedenen Ländern zu prognostizieren. Die zwei identifizierten wichtigsten Kriterien für die Übertragbarkeit (Verfügbarkeit der zur Modellierung benötigten Daten und Flexibilität

der Algorithmen für Anpassungen und Modifikationen) wurden erfüllt. Die benötigte Erfassung von Daten für eine Simulation mit dem TREM-Modell konnte relativ einfach erfolgen. Dies liegt darin begründet, dass der optimierte Ansatz dieses Modells auf die einflussreichsten Parameter, also eine begrenzte Anzahl an Eingangsparametern, fokussiert ist (Anzahl von Gebäuden, Innentemperatur, Außentemperatur, Transmissionswärmeverlust und Nutzungsgrad der Anlagen). Es konnte außerdem gezeigt werden, dass die Flexibilität der Algorithmen des Modells, angepasst bzw. geändert zu werden, um den Endenergiebedarf in verschiedenen Ländern zu prognostizieren, gegeben ist.

Ein Vergleich zwischen dem tatsächlichen Endenergieverbrauch auf Grundlage statistischer Daten für das Fallbeispiel Deutschland und dem mit dem TREM-Modell simulierten Endenergiebedarf zeigt, dass der Mittelwert der prozentualen Differenz niedriger als 5% ist. Die durch die Überprüfung der Genauigkeit des TREM-Modells erhaltenen Resultate zeigen insgesamt, dass das Modell Ergebnisse mit einem Mittelwert der prozentualen Differenz zwischen 2% und 5% für die drei ausgewählten Länder liefern konnte. Außerdem kann mit dem Modell die wahrscheinliche Entwicklung des Trends des Endenergiebedarfs in Wahrscheinlichkeitsbändern bestimmt werden. Hierin geht es über bisherige Modellierungsansätze hinaus. Außerdem ist eine deutliche Korrelation zwischen der Entwicklung des Trends des Endenergieverbrauchs und dem prognostizierten Trend des Endenergiebedarfs mit dem TREM-Modell (Korrelationskoeffizient  $r > 0,35$  für Deutschland,  $r > 0,86$  für Chile,  $r > 0,50$  für UK) zu erkennen. Die meisten der bereits bestehenden Modelle hingegen zeigen für Deutschland Werte des Korrelationskoeffizienten  $r$  zwischen  $-0,55$  und  $-0,74$ . Daher kann der hier vorgeschlagene Ansatz als ein Fortschritt in der Prognose des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor angesehen werden. Um dies abschließend zu verifizieren sind jedoch noch weitere Studien mit den Eingangsdaten weiterer Länder erforderlich.

Die Ergebnisse dieser Arbeit leisten insgesamt einen Beitrag dazu, die bestehende Lücke in den Modellierungsansätzen von Prognosemodellen zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor zu schließen, indem objektive Bewertungskriterien zur Auswahl eines Modellierungsansatzes aufgezeigt, die Übertragbarkeit und Genauigkeit der bestehenden Modelle überprüft, der Einflussgrad der Eingangsparameter bestimmt und bewertet sowie die Unsicherheiten der Modellergebnisse quantifiziert wurden. Außerdem stellt das weiterentwickelte Prognosemodell einen Fortschritt dar, da es nicht nur in der Lage ist, genauere Ergebnisse zu liefern als bereits bestehende Modelle, sondern auch mögliche Schwankungen in der Prognose des Endenergiebedarfs quantifizieren kann.



## Literaturverzeichnis

- [1] R.J. Hwang, F.X. Johnson, R.E. Brown, J.W. Hanford, J.G. Koomey, Residential Appliance Data, Assumptions and Methodology for End-Use Forecasting with EPRI-REEPS 2.1, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkley, USA, 1994.
- [2] F.X. Johnson, R.E. Brown, J.W. Hanford, A.H. Sanstad, J.G. Koomey, Residential HVAC Data, Assumptions and Methodology for End-Use Forecasting with EPRI-REEPS 2.1, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, USA, 1994.
- [3] J.G. Koomey, R.E. Brown, R. Richey, F.X. Johnson, A.H. Sanstad, L. Shown, Residential sector end-use forecasting with eprireeps 2.1: Summary input assumptions and results, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkley, USA, 1995.
- [4] G. Bazán Navarrete, E. Nava Palma, Anexo14: Prospectiva energética para el periodo 2014-2030 del sector energía de México, Secretaría de Energía, Ciudad de Mexico, Mexiko, 2005.
- [5] CEPLAN, Proyecciones de la Matriz Energética al Largo Plazo, Centro Nacional de Planeamiento Estratégico, Lima, Perú, 2011.
- [6] IGCS, Long-Term Energy and Development Pathways For India, Indo-German Centre for Sustainability, Chennai, Indien, 2014.
- [7] S. Lee, J.W. Park, H.J. Song, S. Maken, T. Filburn, Implication of CO<sub>2</sub> capture technologies options in electricity generation in Korea, Energy Policy, 36 (1) (2008) 326-334.
- [8] B. Limmeechokchai, S. Chawana, Sustainable energy development strategies in the rural Thailand: The case of the improved cooking stove and the small biogas digester, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11 (5) (2007) 818-837.
- [9] IAEA, Model for Analysis of Energy Demand (MAED-2) User's Manual, International Atomic Energy Agency, Wien, Österreich, 2006.
- [10] C. Heaps, User guide for LEAP 2008, Stockholm Environment Institute – U.S. Center, Somerville, USA, 2010.
- [11] M. Demary, M. Voigtländer, Immobilien 2025. Auswirkungen des demographischen Wandels auf die Wohn- und Büroimmobilienmärkte, Institut der deutschen Wirtschaft Köln (IW), Köln, Deutschland, 2009.

- [12] BBSR, BBSR Wohnungsmarktprognose 2025, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn, Deutschland, 2011.
- [13] M. Günther, L. Hübl, Wohnungsmangel in Deutschland? Regionalisierter Wohnungsbedarf bis zum Jahr 2025, Eduard Pestel Institut, Hannover, Deutschland, 2009.
- [14] Bayern LB, Deutschland bis 2040 Langfristige Trends und ihre Bedeutung für den Immobilienmarkt, München, Deutschland, 2009.
- [15] J.-P.A. Snäkin, An engineering model for heating energy and emission assessment the case of North Karelia, Finland, *Applied Energy*, 67 (2000) 353-381.
- [16] R. Corradini, M. Beer, T. Schmid, Energiemodell der Wohngebäude, *BWK - Das Energie-Fachmagazin* 64 (1/2) (2012) 48-53.
- [17] IWU, Deutsche Gebäudetypologie Systematik und Datensätze, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Deutschland, 2005.
- [18] H. Farahbakhsh, V.I. Ugursal, A.S. Fung, A Residential End-use Energy Consumption Model for Canada, *Energy Research*, 22 (13) (1998) 1133-1143.
- [19] Cambridge Architectural Research, Cambridge Housing Model and user guide, Department of Energy & Climate Change, London, UK, 2010.
- [20] L.D. Shorrock, J.E. Dunster, The physically-based model BREHOMES and its use in deriving scenarios for the energy use and carbon dioxide emissions of the UK housing stock, *Energy Policy*, 25 (12) (1997) 1027-1037.
- [21] È. Mata, A. Kalagasidis, Calculation of energy use in the Swedish housing - Description of the building energy simulation model EABS: Energy Assessment of Building Stocks, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden, 2009.
- [22] É. Mata, A.S. Kalagasidis, F. Johnsson, A modelling strategy for energy, carbon, and cost assessments of building stocks, *Energy and Buildings*, 56 (2013) 100-108.
- [23] DESTATIS, Gebäude und Wohnungen - Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden, Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden, Lange Reihen ab 1969 - 2013, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 2013.
- [24] V. Cheng, K. Steemers, Modelling domestic energy consumption at district scale: A tool to support national and local energy policies, *Environmental Modelling & Software*, 26 (10) (2011) 1186-1198.

- [25] M. Beer, Regionalisiertes Energiemodell zur Analyse der flexiblen Betriebsweise von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, München, Deutschland, 2012.
- [26] M. Hughes, J. Palmer, V. Cheng, D. Shipworth, Sensitivity and uncertainty analysis of England's housing energy model, *Building Research & Information*, 41 (2) (2013) 156-167.
- [27] R. McKenna, E. Merkel, D. Fehrenbach, S. Mehne, W. Fichtner, Energy efficiency in the German residential sector: A bottom-up building-stock-model-based analysis in the context of energy-political targets, *Building and Environment*, 62 (2013) 77-88.
- [28] M. Kavgic, A. Mavrogianni, D. Mumovic, A. Summerfield, Z. Stevanovic, M. Djurovic-Petrovic, A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector, *Building and Environment*, 45 (7) (2010) 1683-1697.
- [29] C.G. Thomas, D.L. McFadden, Microeconomic Modeling and Policy Analysis: Studies in Residential Energy Demand, Electric Power Research Institute (EPRI), Kalifornien, USA, 1984.
- [30] DCLG, The English House Condition Survey 2007, Department of Communities and Local Government, London, UK, 2009.
- [31] DENA, Dena-Sanierungsstudie. Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand, Deutsche Energie-Agentur GmbH, Berlin, Deutschland, 2010.
- [32] DCLG, The English House Condition Survey 2007, Department of Communities and Local Government, London, UK, 2007.
- [33] STATCAN, 2011 Census of Canada: Topic-based tabulations, Statistics Canada, Ottawa, Kanada, 2016.
- [34] COMMEND, Long-range Energy Alternatives Planning System Version 2012, Community for ENergy environment & Development, Sommerville, USA, 2013.
- [35] H. Mühlbacher, J. Carter, Warmwasserbereitung: Vergleich zentraler und dezentraler Warmwasserversorgung, Energie & Management Verlagsgesellschaft mbH, Herrsching, Deutschland, 2002.

- [36] G. Medina, Bottom-up characterisation of the Spanish building stock – Archetype buildings and energy demand, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden, 2011.
- [37] S. Wanjani, A. Bauer, Bottom-up characterization of the residential German building stock – Reference buildings and energy demand, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden, 2011.
- [38] B.R. Anderson, P.F. Chapman, N.G. Cutland, C.M. Dickson, G. Henderson, J.H. Henderson, P.J. Iles, L. Kosmina, L.D. Shrrock, BREDEM-12 Model description 2001 update, Building Research Establishment (BRE), Watford, UK, 2010.
- [39] W. Ebel, W. Eicke-Hennig, W. Feist, Energieeinsparung bei Alt und Neubauten, Müller Verlag, Heidelberg, Deutschland, 2000.
- [40] HBCS, HOT2000, Natural Resources Canada, Ottawa, Kanada, 2014.
- [41] T. Loga, N. Diefenbach, R. Born, Deutsche Gebäudetypologie, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Deutschland, 2011.
- [42] M. Hughes, J. Palmer, P. Pope, A guide to the Cambridge Housing Model, Cambridge Architectural Research Limited, Cambridge, UK, 2013.
- [43] Ajuntament de Barcelona, Regional Pla de Millora Energètica de Barcelona "Tipologies d'edificis", Ajuntament de Barcelona, Barcelona, Spanien, 2002.
- [44] C. Fieger, C. Steinert, T. Schmid, R. Burhenne, Energienutzungsplan für die Stadt Nürnberg im Rahmen eines integrierten Klimaschutzkonzeptes, Forschungsstelle für Energiewirtschaft mbH (FfE), München, Deutschland, 2011.
- [45] T. Gobmaier, R. Corradini, D. Kraus, U. Wagner, Strukturoptimierung in Ballungsgebieten Energiebedarfsprognose für die Stadt München, Forschungsstelle für Energiewirtschaft mbH (FfE), München, Deutschland, 2007.
- [46] M. Schwentzek, C. Fieger, Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept der Gemeinde Oberschleißheim, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE), München, Deutschland, 2010.
- [47] DECC, Comparing the Cambridge Housing Model against the National Energy Efficiency Data-Framework and Meter Readings, Department of Energy & Climate Change (DECC), London, UK, 2013.

- [48] DESTATIS, Bauen und Wohnen, Mikrozensus - Zusatzerhebung 2006, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte, Fachserie 5/ Heft 1, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 2008.
- [49] J. Hirsch, DOE-2, Lawrence Berkeley National Laboratory, Camarillo, USA, 2012.
- [50] S. Tanatvanit, B. Limmeechokchai, S. Chungpaibulpatana, Sustainable energy development strategies: implications of energy demand management and renewable energy in Thailand, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 7 (5) (2003) 367-395.
- [51] Fundación Bariloche, LEAP Sistema de Planificación de Alternativas Energéticas de Largo Plazo Manual del usuario para la versión 2004, Fundación Bariloche, Bariloche, Argentinien, 2004.
- [52] OECD, IEA, Key World Energy Statistics, Organisation for Economic Co-operation and Development und International Energy Agency , Paris, Frankreich, 2014.
- [53] OECD, Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, Frankreich, 2012.
- [54] Shell, Shell energy scenarios to 2050, Shell International BV, Den Haag, Niederlande, 2008.
- [55] EEA, Final energy consumption by sector and fuel (CSI 027/ENER 016), European Environment Agency 2015, URL: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-8>
- [56] IEA, Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency, International Energy Agency, Paris, Frankreich, 2008.
- [57] P. Meier, Energy systems analysis for developing countries, Springer-Verlag GmbH, Wien, Österreich, 1984.
- [58] L. Swan, V.I. Ugursal, Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (8) (2009) 1819-1835.
- [59] A.T. Booth, R. Choudhary, D.J. Spiegelhalter, Handling uncertainty in housing stock models, Building and Environment, 48 (2012) 35-47.

- [60] T.D. Pettersen, Variation of energy consumption in dwellings due to climate, building and inhabitants, *Energy and Buildings*, 21 (3) (1994) 209-218.
- [61] K.J. Lomas, H. Eppel, Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs, *Energy and Buildings*, 19 (1) (1992) 21-44.
- [62] S.K. Firth, K.J. Lomas, A.J. Wright, Targeting household energy efficiency measures using sensitivity analysis, *Building Research & Information*, 38 (1) (2010) 25-41.
- [63] M. Hughes, J. Palmer, V. Cheng, D. Shipworth, Global sensitivity analysis of England's housing energy model, *Journal of Building Performance Simulation*, 8 (5) (2014) 1-12.
- [64] BMWi, Zahlen und Fakten Energiedaten Nationale und Internationale Entwicklung, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, Deutschland, 2016.
- [65] U. Fahl, M. Blesl, A. Voß, P. Achten, D. Bruchhof, B. Götz, Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 Energieprognose 2009, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) und Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEB), Berlin, Deutschland, 2010.
- [66] J.-F. Hake, P. Hansen, R. Heckler, J. Linßen, D. Martinßen, P. Markewitz, K. Weber, Projektionsrechnungen bis 2050 für das Energiesystem von Deutschland, Verein Deutscher Ingenieure (VDI) und Forschungszentrum Jülich, Jülich, Deutschland, 2009.
- [67] A. Kirchner, F. Matthes, Modell Deutschland Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken, Prognos AG und Öko-Institut, Basel/Berlin, Deutschland, 2009.
- [68] ASUE, Die EnergieEinsparVerordnung EnEV 2009, Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), Berlin, Deutschland, 2009.
- [69] V. Smil, *Energy in World History*, Westview Press, Inc., Boulder, USA, 1994.
- [70] GEA, *Global Energy Assessment Toward a Sustainable Future*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2012.
- [71] DECC, *Energy Consumption in the UK Overall data Tables (Table 1.01)*, Department of Energy and Climate Change (DECC), London, UK, 2015.

- [72] A. Stuible, Ein Verfahren zur Graphentheoretischen Dekomposition und algebraischen Reduktion von komplexen Energiesystemmodellen, Fakultät Energietechnik Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland, 2002.
- [73] STATISTA, Entwicklung der Weltbevölkerungszahl von Christi Geburt bis zum Jahr 2015 (in Milliarden), Statista GmbH, Hamburg, Deutschland, 2015.
- [74] Vereinte Nationen, An Efficient Energy Future Prospects for Europe and North America, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, UK, 1983.
- [75] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, C. Pout, A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings*, 40 (3) (2008) 394-398.
- [76] W. Brune, Energie als Indikator und Promotor wirtschaftlicher Evolution, Vieweg+Teubner Verlag, Leipzig, Deutschland, 2012.
- [77] IEA, World Energy Outlook 2014, International Energy Agency (IEA), Paris, Frankreich, 2014.
- [78] R. Labitzke, Die ökonomische Bedeutung des Mineralöls im Zeichen des globalen Welthandels, Diplomica Verlag GmbH, Hamburg, Deutschland, 2001.
- [79] IEA, Energy and Climate Change, International Energy Agency (IEA), Paris, Frankreich, 2015.
- [80] U. Berner, A. Hollerbach, Klimawandel und CO<sub>2</sub> aus geowissenschaftlicher Sicht, Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf, Deutschland, 2004.
- [81] M.F. Jentsch, Viability of naturally ventilated buildings in the UK under predicted future summer climates, School of Civil Engineering and the Environment, University of Southampton, UK, 2009.
- [82] EOI, Marco normativo y competencial de la economía verde en España 2010, Escuela de Organización Industrial (EOI), Madrid, Spanien, 2011.
- [83] H. Andruleit, H. Babies, J. Meßner, S. Rehder, M. Schauer, S. Schmidt, Kurzstudie Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2011, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, Deutschland, 2011.
- [84] J. Goldemberg, T. Johansson, World Energy Assessment: Overview 2004 Update, United Nations Development Programme, New York, USA, 2004.

- [85] COM, 20 20 by 2020: Europe's Climate Change Opportunity - 2008: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Commission of the European Communities, Brüssel, 2008.
- [86] EU, Directive 2012/27/EU EC of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC, Official Journal of the European Union, 315 (2012) 1-56.
- [87] Vereinte Nationen, Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change, 1998.
- [88] UBA, Energieeffizienzdaten für den Klimaschutz, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Deutschland, 2012.
- [89] Richtlinie: 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG, 2009.
- [90] EPPO, Energy Statistics of Thailand 2013, Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy, Bangkok, Thailand, 2013.
- [91] DPPE, Balance Nacional de Energia (1990-2013), División de Prospectiva y Política Energética del Ministerio de Energia (DPPE), Santiago, Chile, 2015.
- [92] APEC, PEER review on energy efficiency in Thailand, Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC), 2010.
- [93] CNE, BNE 2013 - Distribución Consumo Total, Comisión Nacional de Energia (CNE), Santiago, Chile, 2016.
- [94] TWB, Energy use (kg of oil equivalent per capita), The World Bank 2015, URL: <http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE/countries>
- [95] AChEE, Consumo de energía en Chile, Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE), Santiago, Chile, 2016.
- [96] GNESD, Energy security in Thailand, Global Network on Energy for Sustainable Development 2010, URL: <http://www.gnesd.org/PUBLICATIONS/Energy-Security-Theme>



- [97] H. Nakagami, C. Murakoshi, Y. Iwafune, International Comparison of Household Energy Consumption and Its Indicator, American Council for an Energy-Efficient Economy, 1 (8) (2008) 214-224.
- [98] K. Promjiraprawat, P. Winyuchakrit, B. Limmeechokchai, T. Masui, T. Hanaoka, Y. Matsuoka, CO<sub>2</sub> mitigation potential and marginal abatement costs in Thai residential and building sectors, Energy and Buildings, 80 (2014) 631-639.
- [99] INE, CHILE: Proyecciones y Estimaciones de Población. Total País Período de Información: 1950-2050, Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Santiago, Chile, 2015.
- [100] R. O’Ryan, M. Díaz, J. Clerc, Consumo de Energía y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Chile 2007-2030 y Opciones de Mitigación, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2010.
- [101] IAP, Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores, Instituto de Asuntos Públicos (IAP), Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2008.
- [102] MIENER, Programa País de Eficiencia Energética, Ministerio de Energía (MINIER), Santiago, Chile, 2007.
- [103] INN, NCh 1079 Arquitectura y construcción - Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico, Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile, 2008.
- [104] M.P. Aedo, S. Larrain, Guía práctica para el uso eficiente de la energía, Manual para consumidores y usuarios, Ministerio de Energía, Programa Chile Sustentable, Santiago, Chile, 2005.
- [105] MIENER, Plan de acción de eficiencia energética 2020, Ministerio de Energía (MIENER), Santiago, Chile, 2012.
- [106] BMUB, Die deutsche Klimaschutzpolitik, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Berlin, Deutschland, 2015.
- [107] BMWi, 2. Nationaler Energieeffizienz-Aktionsplan (NEEAP) der Bundesrepublik Deutschland, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin, Deutschland, 2011.

- [108] UBA, Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Deutschland, 2013.
- [109] DECC, Energy Consumption in the UK (2015) Chapter 1: Overall energy consumption in the UK since 1970, Departament of Energy Climate Change (DECC), London, UK, 2015.
- [110] H.-J. Wagner, Was sind die Energien des 21. Jahrhunderts?: Der Wettlauf um die Lagerstätten, Fischer Verlag GmbH, Frankfurt, Deutschland, 2010.
- [111] D. Oesterwind, Energie und Klimaforschung: In 28 Tagen rund um den Globus, Springer-Verlag GmbH, Heidelberg, Deutschland, 2011.
- [112] M. Kaufmann, Plasmaphysik und Fusionsforschung, Springer-Verlag GmbH, Heidelberg, Deutschland, 2013.
- [113] V. Wesselak, T. Schabbach, T. Link, J. Fischer, Regenerative Energietechnik, Springer-Verlag, Nordhausen, Deutschland, 2013.
- [114] V. Crastan, Elektrische Energieversorgung 2: Energiewirtschaft und Klimaschutz Elektrizitätswirtschaft, Liberalisierung Kraftwerktechnik und alternative Stromversorgung, chemische Energiespeicherun, Springer-Verlag GmbH, Heidelberg, Deutschland, 2011.
- [115] N.P. Romero Ramos, Consumo de energía a nivel residencial en Chile y análisis de eficiencia energética en calefacción, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2011.
- [116] L. Price, L. Michaelis, E. Worrell, M. Khrushch, Sectoral Trends and Driving Forces of Global Energy Use and Greenhouse Gas Emissions, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 3 (2) (1998) 263-319.
- [117] R. Saidur, H.H. Masjuki, M.Y. Jamaluddin, An application of energy and exergy analysis in residential sector of Malaysia, Energy Policy, 35 (2) (2007) 1050-1063.
- [118] EIA, International Energy Outlook 2013 with Projections to 2040, U.S. Energy Information Administration (EIA), Washington, USA, 2013.
- [119] BREE, Australian energy statistics, Bureau of Resources and Energy Economics, Canberra, Australien, 2014.

- [120] OEE, Energy Use Data Handbook, 1990 to 2010, 11 ed., Office of Energy Efficiency Natural Resources Canada, Ottawa, Kanada, 2013.
- [121] R. O’Ryan, Diseño de un Modelo de Proyección de Demanda Energética Global Nacional de Largo Plazo, Comisión Nacional de Energía, Santiago, Chile, 2008.
- [122] S. Chen, N. Li, J. Guan, Y. Xie, F. Sun, J. Ni, A statistical method to investigate national energy consumption in the residential building sector of China, Energy and Buildings, 40 (4) (2008) 654-665.
- [123] MEDDE, Parc des chauffages centraux des résidences principales, en milieu d’année jusqu’en 2009, 2009.
- [124] ENEA, Rapporto annuale efficienza energetica, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile, Rome, Italy, 2012.
- [125] ECCJ, Japan Energy Conservation Handbook 2011, Tokyo, Japan, 2011.
- [126] MAPS, Energy modelling for the residential sector A summary of the SATIM methodology, Mitigation Action Plans and Scenarios Cape Town, South Africa, 2013.
- [127] IDAE, Análisis del consumo energético del sector residencial en España, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid, Spain, 2011.
- [128] EIA, Residential Sector Key Indicators and Consumption, Reference case, Washington D.C., USA, 2015.
- [129] DECC, Statistics Energy consumption in the UK, Departament of Energy and Climate Change, London, UK, 2014.
- [130] IEA, Key World Energy Statistics, International Energy Agency (IEA), Paris, Frankreich, 2016.
- [131] NBSC, China Statistical Yearbook 2013, National Bureau of Statistics of China (NBSC), Peking, China, 2013.
- [132] ABS, 8731.0 - Building Approvals, Australia, Nov 2015, Australian Bureau of Statistics (ABS), Sydney, Australien, 2016.
- [133] S. Bureau, Survey Results of the Housing and Land Survey (Statistical Tables), Ministry of Internal Affairs and Communications, Tokyo, Japan, 2016.

- [134] DCESA, Summary Population and Housing Characteristics 2010 Census of Population and Housing, U.S. Department of Commerce Economics and Statistics Administration (DCESA), Washington D.C., USA, 2013.
- [135] DCLG, Statistical data set live tables on dwelling stock Table 101: by tenure, United Kingdom (historical series), Department for Communities and Local Government (DCLG), London, UK, 2016.
- [137] INE, NEbase / Demografía y población / Cifras de población y censos demográficos / Censos de Población y Viviendas 2011, Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Madrid, Spanien, 2016.
- [138] INSEE, Le parc de logements en France, Institut national de la statistique et des études économiques, Strasbourg, Frankreich, 2016.
- [139] ISTAT, Popolazione e famiglie, Istituto nazionale di statistica, Roma, Italien, 2016.
- [140] Statssa, General household survey 2013, Statistics South Africa, Pretoria, Südafrika, 2014.
- [141] WBG, Population total, The World Bank Group (WBG) 2016, URL: <http://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>
- [142] EU, Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, Official Journal of the European Union, 140 (2009) 16-62.
- [143] AGEb, Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2011, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEb), Berlin, Deutschland, 2012.
- [144] AGEb, Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2013, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEb), Berlin, Deutschland, 2014.
- [145] BMWi, Energiedaten: Gesamtausgabe Stand: Oktober 2015, Bundesminister für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2015.
- [146] AGFW, AGFW- Hauptbericht 2013, Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (AGFW), Frankfurt, Deutschland, 2014.
- [147] UBA, Energieeffizienz in Zahlen, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Deutschland, 2011.

- [148] DESTATIS, Energieverbrauch der privaten Haushalte von 1995 bis 2006 leicht gesunken, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 2008.
- [149] DESTATIS, Gebäude und Wohnungen - Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden, Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden, Lange Reihen ab 1969 - 2013, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 2015.
- [150] K. Usemann, Energieeinsparende Gebäude und Anlagentechnik: Grundlagen, Auswirkungen, Probleme und Schwachstellen, Wege und Lösungen bei der Anwendung der EnEV, Springer-Verlag GmbH, Berlin, Deutschland, 2004.
- [151] UBA (Hrsg), Energieeffizienz in Zahlen, Endbericht, Öko - Institute und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (FhG-ISI), Umweltbundesamt Dessau-Roßlau, Deutschland, 2011.
- [152] UBA, Excel-Tool für das Projekt Energieeffizienz in Zahlen, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Deutschland, 2011.
- [153] IWU, Gradtagszahlen\_Deutschland.xls, Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, Deutschland, 2012.
- [154] Prognos AG, Öko-Institut, Modell Deutschland - Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken, Endbericht, Prognos AG / Öko-Institut, Basel, Switzerland / Berlin, Deutschland, 2009.
- [155] K. Usemann, Energieeinsparende Gebäude und Anlagentechnik: Grundlagen, Auswirkungen, Probleme und Schwachstellen, Wege und Lösungen bei der Anwendung der EnEV, Springer-Verlag GmbH, Berlin, Deutschland, 2004.
- [156] M. Beer, R. Corradini, C. Fieger, T. Gobmaier, L. Köll, R. Podhajsky, M. Steck, M. Zotz, Endbericht Energiezukunft 2050, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, Deutschland, 2009.
- [157] M. Beer, R. Corradini, T. Gobmaier, L. Köll, R. Podhajsky, G. Vogler, M. Zotz, CO<sub>2</sub>-Verminderung in Deutschland, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, Deutschland, 2009.
- [158] M. Bost, B. Meyer, B. Hirschl, Überarbeitung der Vergabegrundlage für das Umweltzeichen „Warmwasserspeicher“ (RAL-UZ 124), Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin & Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg, Deutschland, 2011.

- [159] GRE, Energieeinsparung im Gebäudebestand, BAUCOM Verlag für Marketing und Kommunikation, Böhl-Iggelheim, Deutschland, 1996.
- [160] G. Hauser, G. Hausladen, Energiekennzahl zur Beschreibung des Heizenergieverbrauchs von Gebäuden, Baucom Verlag, Böhl-Iggelheim, Deutschland, 1990.
- [161] G. Hauser, G. Hausladen, Energiepaß. Energetische Bewertung von Wohngebäuden mit Hilfe einer Energiekennzahl, Abschlußbericht, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, Deutschland, 1993
- [162] G. Hauser, G. Hausladen, F. Otto, Energieeinsparung im Gebäudebestand: Bauliche und Anlagentechnische Lösungen, Baucom Verlag, Böhl-Iggelheim, Deutschland, 1996.
- [163] L. Joos, Energieeinsparung in Gebäuden, Vulkan-Verlag GmbH, Essen, Deutschland, 2004.
- [164] T. Loga, N. Diefenbach, J. Knissel, R. Born, Kurzverfahren Energieprofil, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, Deutschland, 2005.
- [165] T. Loga, U. Imkeller-Benjes, Energiepaß Heizung/Warmwasser Energetische Qualität von Baukörper und Heizungssystem, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, Deutschland, 1997.
- [166] W. Messer, Wie effizient ist LED-Beleuchtung?, Sinzheim, Deutschland, 2013.
- [167] W. Stiftung, Energieeffiziente Architektur, Krämer Verlag, Stuttgart, Deutschland, 2010.
- [168] P. Tzscheutschler, M. Nickel, I. Wernicke, H.G. Buttermann, Energieverbrauch in Deutschland - Stand 2007: Daten, Fakten, Kommentare, BWK - Das Energie-Fachmagazin 61 (6) (2009) 6-14.
- [169] UBA, Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Deutschland, 2013.
- [170] U. Wagner, W. Mauch, R. Corradini, Primärenergetische Bewertung von Fernwärme, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), München, Deutschland, 2009.
- [171] C. Zürcher, T. Frank, Bauphysik Bau und Energie Leitfaden für Planung und Praxis, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, Deutschland, 1997.

- [172] C. Lave, J. March, *An Introduction to Models*, Social Sciences University Press of America Inc., Lanham, USA, 1993.
- [173] C. Delmastro, E. Lavagno, G. Mutani, Chinese residential energy demand: Scenarios to 2030 and policies implication, *Energy and Buildings*, 89 (2015) 49-60.
- [174] Z. Yu, B.C.M. Fung, F. Haghighat, H. Yoshino, E. Morofsky, A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption, *Energy and Buildings*, 43 (6) (2011) 1409-1417.
- [175] S. Wischermann, *Zukünftiger regionaler Endenergiebedarf deutscher Haushalte unter Berücksichtigung des demografischen Wandels*, LIT Verlag, Münster, Deutschland, 2013.
- [176] J.G. Koomey, R.E. Brown, R. Richey, F.X. Johnson, A.H. Sanstad, L. Shown, *Residential sector end-use forecasting with eprereps 2.1: Summary input assumptions and results*, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkley, USA, 1995.
- [177] É. Mata, A. Sasic Kalagasidis, F. Johnsson, Energy usage and technical potential for energy saving measures in the Swedish residential building stock, *Energy Policy*, 55 (2013) 404-414.
- [178] BRE, SAP 2005, *The Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings*, Building Research Establishment, Watford, UK, 2009.
- [179] Cambridge Architectural Research, *Cambridge Housing Model and user guide*, Department of Energy & Climate Change, 2010.
- [180] BRE, SAP 2009, *The Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings*, Building Research Establishment, Watford, UK, 2011.
- [181] N. Diefenbach, H. Cischinsky, M. Rodenfels, K.-D. Clausnitzer, *Datenbasis Gebäudebestand Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand*, Stuttgart, Deutschland, 2011.
- [182] AGEb, *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2012*, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., Berlin, Deutschland, 2013.
- [183] EC, Eurostat Database, European Commission (EC), Brüssel, Belgien, 2010.

- [184] Enerdata, ODYSSEE Database European Energy Efficiency Indicators NRDLINK 4.1 (SP1), Enerdata 2010, URL: <http://www.odyssee-indicators.org/database/> database.php
- [185] M. Kavacic, D. Mumovic, A. Summerfield, Z. Stevanovic, O. Ecim-Djuric, Uncertainty and modeling energy consumption: Sensitivity analysis for a city-scale domestic energy model, *Energy and Buildings*, 60 (2013) 1-11.
- [186] F. Wilms, Szenariotechnik: Vom Umgang mit der Zukunft Haupt Verlag, Bern, Schweiz, 2006.
- [187] B. Chateau, B. Lapillonne, M. Alinhac, B. Laponche, G. Moury, La demande d'énergie finale de la France à l'horizon 2000: trois scénarios par la méthode MEDEE, Institut Economique et Juridique de l'Energie, Paris, Frankreich, 1979.
- [188] L.D. Shorrock, J. Henderson, J.I. Utley, Reducing carbon emissions from the UK housing stock, , Building Research Establishment (BRE), Garston, UK, 2005.
- [189] J. Dargay, Have Low Oil Prices Reversed The Decline in Energy Demand?, Oxford Institute for Energy Studies, Oxford, UK, 1990.
- [190] J. Dargay, The Irreversible Demand Effects of High Oil Prices: Motor Fuels in France, Germany and the UK, Oxford Institute for Energy Studies, Oxford, UK, 1991.
- [191] OCDE, Évolution des prix du pétrole : Moteurs, conséquences économiques et ajustement des politiques in: 76 (Ed.), Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, Frankreich, 2004.
- [192] DGEC, La consommation de produits pétroliers et gaziers, Direction Générale de l'Energie et du Climat – Direction de l'Energie, Puteaux, Frankreich, 2010.
- [193] CGDD, Chiffres clés de l'énergie, Commissariat général au développement durable, Paris, Frankreich, 2015.
- [194] MATET, Isolation thermique et réglage automatique des installations de chauffage dans les batiments d'installation, Ministère de l'aménagement du territoire de l'équipement et des transports, Paris, Frankreich, 1974.
- [195] P. Baudry, M. Laurent, G. Binet, Efficacité énergétique Des principes aux réalités, Paris, Frankreich, 2015.



- [196] Kyos Ingénierie, Historique des Réglementations Thermiques, Nantes, Frankreich, 2016.
- [197] L.D. Shorrock, J.H.F. Bown, Domestic Energy Fact File 1993 Update, Building Research Establishment (BRE), Watford, UK 1993.
- [198] J.E. Dunster, I. Michel, L.D. Shorrock, J.H.F. Bown, Domestic Energy File: Local Authority Homes, in: 272, Building Research Establishment (BRE), Watford, UK, 1994.
- [199] J.E. Dunster, I. Michel, L.D. Shorrock, J.H.F. Bown, Domestic Energy Fact File: Owner Occupied Homes, in: 271, Building Research Establishment (BRE), Watford, UK, 1994.
- [200] J.E. Dunster, I. Michel, L.D. Shorrock, J.H.F. Bown, Domestic Energy File: Privated Rented Homes, in: 273, Building Research Establishment (BRE), Watford, UK, 1994.
- [201] L.D. Shorrock, G. Henderson, J.H.F. Bown, Domestic Energy Fact File, Building Research Establishment (BRE), Watford, UK 1992.
- [202] L.D. Shorrock, Persönliche Korrespondenz vom 14. Januar 2014.
- [203] M. Ray, K. Losse, A. Simpson, N. Thomas, J. Farrant, J. Cavanagh, Programmes to reduce household energy consumption, National Audit Office (NAO), London, UK, 2008.
- [204] DECC, Statistical-release: Estimates of Home Insulation Levels in Great Britain: January 2012, Department of Energy & Climate Change, London, UK, 2012.
- [205] DCLG, English Housing Survey Headline Report, Department for Communities and Local Government, London, UK, 2014.
- [206] C. Böhringer, T. Rutherford, Combining bottom-up and top-down, Energy Economics, 30 (2) (2008) 574-596.
- [207] H.K. Jacobsen, Integrating the bottom-up and top-down approach to energy-economy modelling: the case of Denmark, Energy Economics, 20 (4) (1998) 443-461.
- [208] D. Johnston, A physically-based energy and carbon dioxide, Ph.D. Thesis, Leeds Metropolitan University, Leeds, UK, 2003.

- [209] L.G. Swan, V.I. Ugursal, I. Beausoleil-Morrison, Occupant related household energy consumption in Canada: Estimation using a bottom-up neural-network technique, *Energy and Buildings*, 43 (2011) 326-337.
- [210] DENA, Dena-Gebäudereport Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand, Deutsche Energie-Agentur GmbH, Berlin, Deutschland, 2012.
- [211] T. Nakata, Energy-economic models and the environment, *Progress in Energy and Combustion Science*, 30 (4) (2004) 417-475.
- [212] S.C. Bhattacharyya, G.R. Timilsina, A review of energy system models, *International Journal of Energy Sector Management*, 4 (4) (2010) 494-518.
- [213] S. Heiple, D.J. Sailor, Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles, *Energy and Buildings*, 40 (8) (2008) 1426-1436.
- [214] UBA, Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Deutschland, 2015.
- [215] N. Diefenbach, R. Born, Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Deutschland, 2007.
- [216] DESTATIS, Statistik lokal : Daten für die Gemeinden, kreisfreien Städte und Kreise Deutschlands, Statistisches Bundesamt, Düsseldorf, Deutschland, 2008.
- [217] C. Fieger, A. Gruber, M. Schwentzek, Zukünftige Wärmestruktur der Stadt Passau, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V (FfE), München, Deutschland, 2010.
- [218] W. Ebel, W. Eicke-Hennig, W. Feist, Energieeinsparung bei Alt und Neubauten, Müller Verlag, Heidelberg, Deutschland, 2000.
- [219] N. Diefenbach, H. Cischinsky, M. Rodenfels, K.-D. Clausnitzer, Datenbasis Gebäudebestand Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand, Institut Wohnen und Umwelt and Bremer Energie Institut, Darmstadt, Deutschland, 2010.
- [220] R. Born, N. Diefenbach, T. Loga, Energieeinsparung durch Verbesserung des Wärmeschutzes und Modernisierung der Heizungsanlage für 31 Musterhäuser der Gebäudetypologie, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Deutschland, 2003.

- [221] S. Klauß, W. Kirchhof, J. Gissel, Erfassung regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten, Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., Kassel, Deutschland, 2009.
- [222] D. Walberg, A. Holz, T. Gniechwitz, T. Schulze, Wohnungsbau in Deutschland - 2011 Modernisierung oder Bestandsersatz, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Kiel, Deutschland, 2011.
- [223] DWD, Climate Data Center, Deutscher Wetterdienst Klima und Umwelt, Offenbach, Deutschland, 2015.
- [224] DIN, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, DIN V 18599-10:2011-12, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Deutschland, 2011.
- [225] K.-D. Clausnitzer, J. Gabriel, N. Diefenbach, T. Loga, W. Wosniok, Ermittlung von Effekten des KfW-CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramms - Entwicklung der Methodik und Ergebnisse der Berichtsperioden 2005 und 2006, Bremer Energie Institut, Institut Wohnen und Umwelt and Institut für Statistik der Universität Bremen, Bremen, Deutschland, 2007.
- [226] DESTATIS, Erhebung über Abgabe, Ein- und Ausfuhr von Erdgas und Erdölgas sowie Erlöse der Produzenten, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 2013.
- [227] M. Frondel, M. Andor, N. Ritter, S. Sommer, C. Vance, P. Matuschek, U. Müller, Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2011-2013, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), Essen & forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH, 2015.
- [228] DESTATIS, Mikrozensus2010, Qualitätsbericht, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 2011.
- [229] H.G. Buttermann, T. Baten, F. Musiol, T. Nieder, R. Erler, T. Raabe, Verfahren zur regelmäßigen und aktuellen Ermittlung des Energieverbrauchs in nicht von der amtlichen Statistik erfassten Bereichen, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Münster, Deutschland, 2015.
- [230] J.P. Zühlke, Die Verbreitung von Wissen zu Controlling-Instrumenten, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, Deutschland, 2007.

- [231] A. Saltelli, K. Chan, E.M. Scott, Sensitivity Analysis, John Wiley and Sons publishers, New York, USA, 2000.
- [232] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo, M. Ratto, Sensitivity Analysis in Practice. A Guide to Assessing Scientific Models, John Wiley and Sons, Chichester, UK, 2004.
- [233] J. Keirstead, C. Calderon, Capturing spatial effects, technology interactions, and uncertainty in urban energy and carbon models: Retrofitting Newcastle as a case-study, *Energy Policy*, 46 (2012) 253-267.
- [234] N. Eyre, P. Baruah, Uncertainties in future energy demand in UK residential heating, *Energy Policy*, 87 (2015) 641-653.
- [235] G. Rodríguez, A. Carrillo Andrés, F. Domínguez Muñoz, J.M. Cejudo López, Y. Zhang, Uncertainties and sensitivity analysis in building energy simulation using macroparameters, *Energy and Buildings*, 67 (2013) 79-87.
- [236] R. Iman, J. Helton, An Investigation of Uncertainty and Sensitivity Analysis, *Risk Analysis*, 8 (1) (1988) 71-90.
- [237] I. Macdonald, P. Strachan, Practical application of uncertainty analysis, *Energy and Buildings*, 33 (2001) 219-227.
- [238] ORACLE 2015. Crystal Ball. Redwood Shores, CA.
- [239] C. Cottin, S. Döhler, Risikoanalyse Modellierung, Beurteilung und Management von Risiken mit Praxisbeispielen, Springer Fachmedien, Wiesbaden, Deutschland, 2013.
- [240] D.W. Scott, On optimal and data-based histograms, *Biometrika*, 66 (3) (1979) 605-610.
- [241] DESTATIS, Bautätigkeit und Wohnungen, Bestand an Wohnungen Fachserie 5 / Reihe 3, Statistischen Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 2011.
- [242] J. Hirsch, Manual DOE-2 Building Energy Use and Cost Analysis Program, Lawrence Berkley National Laboratory, Berkley, USA, 2004.
- [243] DESTATIS, Bauen und Wohnen Baugenehmigungen / Baufertigstellungen u. a. nach der Gebäudeart Lange Reihen z. T. ab 1960, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 2010.
- [244] DESTATIS, Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Bevölkerungsfortschreibung, Fachserie 1, Reihe 1.3, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 2012.

- [245] P. Tzscheutschler, M. Nickel, I. Wernicke, H.G. Buttermann, Energieverbrauch in Deutschland - Stand 2007: Daten, Fakten, Kommentare, BWK - Das Energie- Fachmagazin 61 (6) (2009) 6-14.
- [246] M. Bost, B. Meyer, B. Hirschl, Überarbeitung der Vergabegrundlage für das Umweltzeichen ?Warmwasserspeicher? (RAL-UZ 124), in, Institut für Ökologie und Politik GmbH - Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.
- [247] DESTATIS, Bautätigkeit und Wohnungen Mikrozensus - Zusatzerhebung 2006 Bestand und Struktur der Wohneinheiten Wohnsituation der Haushalte, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Wiesbaden, Deutschland, 2008.
- [248] W. Schulz (ed.), Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030: Energiewirtschaftliche Referenzprognose – Kurzfassung, Energiereport IV, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Köln, Deutschland & Prognos AG, Basel, Schweiz, 2005.
- [249] M. Frondel, P. Grösche, H. Tauchmann, B. Krause, A. Wolf, D. Pantigoso, Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für das Jahr 2003, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), Essen & forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH, 2005.
- [250] DESTATIS, Energieverbrauch der privaten Haushalte - Wohnen, Mobilität, Konsum und Umwelt, Statistisches Bundesamt, Berlin, Deutschland, 2008.
- [251] H.-D. Hegner, I. Vogler, Energieeinsparverordnung EnEV - für die Praxis kommentiert: Wärmeschutz und Energiebilanzen für Neubau und Bestand. Rechenverfahren, Beispiele und Auslegungen für die Praxis, John Wiley & Sons, Berlin, Deutschland, 2002.
- [252] J. Lin, B. Cao, S. Cui, W. Wang, X. Bai, Evaluating the effectiveness of urban energy conservation and GHG mitigation measures: The case of Xiamen city, China, Energy Policy, 38 (9) (2010) 5123-5132.
- [253] DESTATIS, 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung für Deutschland, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 2015.
- [254] DCLG, The English House Condition Survey 2001, Department of Communities and Local Government, London, UK, 2001.

- [255] DCLG, English Housing Survey (EHS), Department of Communities and Local Government, London, UK, 2011.
- [256] DESTATIS, Publikationen im Bereich Wohnungsbestand, Statistische Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 2015.
- [257] DESTATIS, Bauen und Wohnen Baugenehmigungen / Baufertigstellungen Lange Reihen z. T. ab 1949, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 2015.
- [258] J. Schnieders, Dynamisches Verhalten und Wärmeübergabeverluste von Flächenheizungen, Passivhaus Institut, Darmstadt, Deutschland, 2005.
- [259] BSA, Werk, Bauen und Wohnen Band 69, Ausgaben 1-6, Bund Schweizer Architekten, Basel, Schweiz, 1987.
- [260] J. Isele, Bestimmung der Heizgrenztemperatur, Karlsruher Institut für Technologie Karlsruhe, Karlsruhe, Deutschland, 2009.
- [261] IES, Energetisch relevante Kennwerte eines Gebäudes, Kennwerte Außentemperatur, Institut für Energieoptimierte Systeme, Ostfalia Hochschule, Wolfenbüttel, Deutschland, 2015.
- [262] T. Loga, Die Heizperiodenbilanz im Vergleich zum Monatsbilanzverfahren Abschätzung der Heizgrenztemperaturen und Bilanzzeiten für das Heizperiodenbilanzverfahren nach EN 832 / DIN V 4108-6, Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, Deutschland, 2004.
- [263] CDT, Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservacion de la energía en el sector residencial, Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT), Santiago, Chile, 2010.
- [264] WärmeschutzV, Verordnung über den energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung - WärmeschutzV) vom 16.08.1994, BGBl. I S. 2121.
- [265] Richtlinie, BGBl. I S. 796 Verordnung über das Inverkehrbringen von Heizkesseln und Geräten nach dem Bauproduktengesetz, European Union (Ed.), 1998.
- [266] INE, Resultados Preliminares Censo de Población y Vivienda 2012, Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Santiago, Chile, 2012.

- [267] OECD, Die OECD in Zahlen und Fakten: Einkommen und Vermögen der privaten Haushalte, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Berlin, Deutschland, 2016.
- [268] Met Office, UK climate: averages table, Exeter 2016, URL: <http://www.metoffice.gov.uk/>
- [269] Wetter, Klima für Deutschland Jahresübersicht, Köln 2016, URL: [www.wetter.de](http://www.wetter.de)
- [270] INE, Medio Ambiente informe anual 2014, Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Santiago, Chile, 2014.
- [271] M. Kotték, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, F. Rubel, World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, Meteorologische Zeitschrift, 15 (3) (2006) 259-263.
- [272] CCHC, Balance de la vivienda en Chile Actualización del Balance de la Vivienda 2008, considerando la evolución sectorial, los requerimientos habitacionales y proyecciones en el mediano plazo, Camara Chilena de la Construcción (CCHC), Santiago, Chile, 2011.
- [273] MINVU, Tipología de viviendas según CENSO 2002, Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), Santiago, Chile, 2008.
- [274] DGA, Anuario climatológico, Dirección General de Aeronáutica (DGA), Santiago, Chile, 2015.
- [275] Met Office, Temperature, rainfall and sunshine time-series, Exeter 2016, URL: <http://www.metoffice.gov.uk/>
- [276] F.C. Damico, R.G. Alvarado, U. Bruscatto, M.T. Kelly, O.E. Oyola, M. Diaz, Análisis energético de las viviendas del centro-sur de Chile, Arquitecturarevista, 8 (1) (2012) 62-75.
- [277] MINVU, Manual de aplicación reglamentación térmica, Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), Santiago, Chile, 2006.
- [278] E. Müller, Mejoramiento Térmico de Viviendas con Climatización Pasiva para la Zona Central de Chile con Programas de Simulación Térmica, Escuela de Arquitectura de la Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile 1998.

- [279] S. Natarajan, J. Padget, L. Elliott, Modelling UK domestic energy and carbon emissions: an agent-based approach, *Energy and Buildings*, 43 (10) (2011) 2602-2612.
- [280] BBSR, Wärmeschutzverordnung, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn, Deutschland, 2015.
- [281] A. Martinez, M.F. Jentsch, Quantifizierung der langfristigen Entwicklung des Nutzungsgrades von Anlagen und Geräten im Wohnungssektor in Deutschland und Bestimmung zukünftiger Energieeinsparpotenziale im Hinblick auf die Klimaschutzziele der Bundesregierung, *Bauphysiktag Kaiserslautern 2015*, Kaiserslautern, 2015, pp. 137-141.
- [282] M. Kaltschmitt, W. Streicher, (Hrsg.), *Regenerative Energien in Österreich: Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung*, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, Deutschland, 2009.
- [283] R. Paschotta, *RP-Energie-Lexikon - Gradtagszahl*, RP Photonics Consulting GmbH, Bad Dürkheim, Deutschland, 2016.
- [284] ELBAU, *Anforderungen an Passivhäuser*, Bauhaus-Universität Weimar, Elearning Bauphysik, Weimar, Deutschland, 2014.
- [285] W. Feist, *Nullenergiehaus und Nullheizenergiehaus*, Passivhaus Institut, Darmstadt, Deutschland, 2016.
- [286] G. Reuter, *Schimmelpilz in der Wohnung. Vorbeugen – Ursachen erkennen – Bekämpfen*, Verlag Dashöfer GmbH, Hamburg, Deutschland, 2010.
- [287] G. Lohmeyer, H. Bergmann, M. Post, *Praktische Bauphysik. Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen*, Teubner Verlag, Wiesbaden, Deutschland, 2005.
- [288] EnEV, *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV) vom 24.07.2007*, BGBl. I S. 1519, zuletzt geändert 24.10.2015, BGBl. I S. 1789.
- [289] BBSR, *Wärmeschutzverordnung 1982/84 (SZweite Wärmeschutzverordnung)*, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn, Deutschland, 2015.



- [290] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, R. Born, Deutsche Wohngebäudetypologie Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), Darmstadt, Deutschland, 2015.
- [291] M. Richter, Energieeinsparverordnung (EnEV) „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik von Gebäuden“, Hans Dönges GmbH – Beratende Ingenieure, Deutschland, 2015.
- [292] M. Töllner, Zur Novellierung der EnEV Die Einführung des Energieausweises im Gebäudebestand, Der Bausachverständige, 4 (6) (2008) 64-68.
- [293] BDEW, Endenergieverbrauch in Deutschland 2007, BDEW-Projektgruppe „Nutzenergiebilanzen“, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., München, Deutschland, 2008.

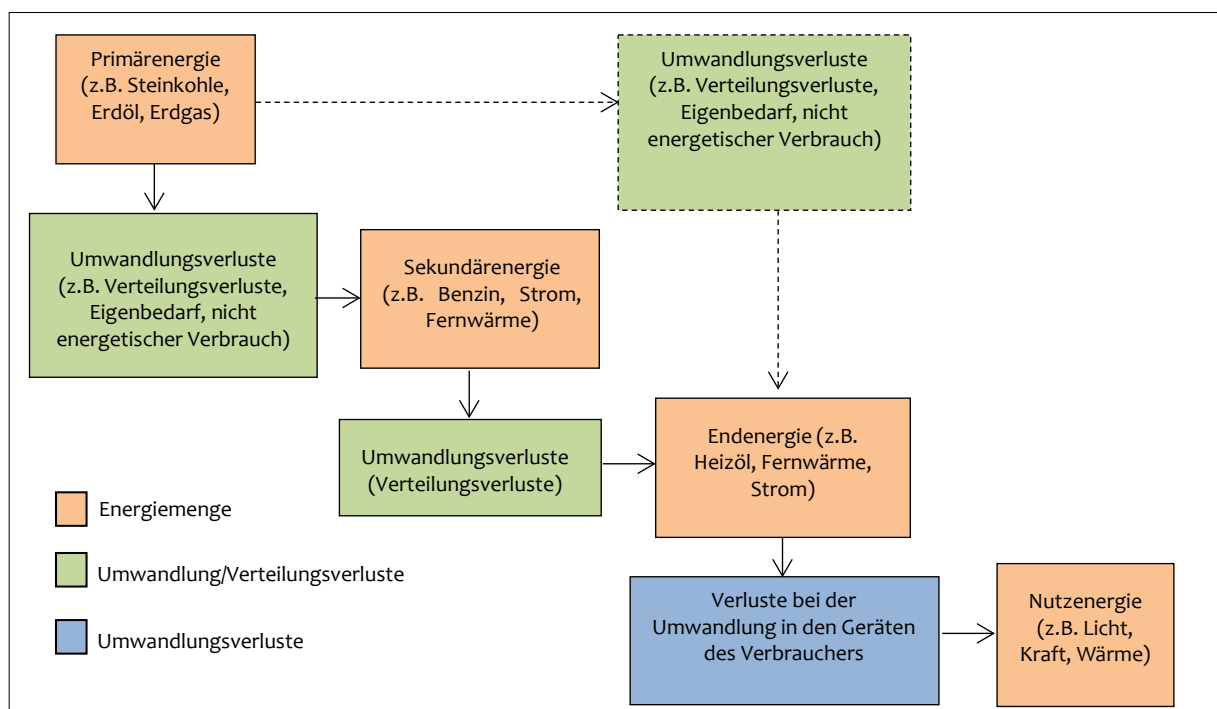


## A Definitionen

### A.1 Energieverbrauch und Energiebedarf

Energieverbrauch und Energiebedarf werden in dieser Arbeit unterschieden. Unter Energieverbrauch ist die gemessene Energiemenge zu verstehen, die ein Gebäude oder ein Land tatsächlich benötigt und unter Energiebedarf die rechnerisch ermittelte Größe der benötigten Energiemenge.

Der Energiebedarf wird zum Beispiel mit Hilfe von mittleren Klimadaten, einem definierten Nutzerverhalten, einer definierten Innentemperatur des Gebäudes, sowie angenommenen Energiequellen ermittelt [251]. Im Gegensatz hierzu wird die tatsächlich verbrauchte Energiemenge, die sich statistisch erfassen lässt, als „Energieverbrauch“ bezeichnet. Zukünftige Energiemengen, welche durch Modelle prognostiziert werden, werden als „Energiebedarf“ bezeichnet. Es ist anzumerken, dass der tatsächliche Energieverbrauch in der Regel wegen der realen Bedingungen vor Ort (z.B. örtliche Klimabedingungen, abweichendes Nutzerverhalten) vom berechneten Energiebedarf abweicht. Die Umwandlung von Energie wird entsprechend (Abb. A.1) klassifiziert.



**Abb. A.1:** Energieumwandlungskette abgeleitet aus Datenquelle: [282]

### **Primärenergie**

Die Primärenergie ist die Energiemenge, die für die gesamte Prozesskette von der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der jeweils eingesetzten Brennstoffe bis zum Endverbraucher benötigt wird. Es wird zwischen fossilen Energieträgern (Kohle, Erdöl, Erdgas), Kernenergieträgern (Uran, Thorium) und regenerativen Energieträgern (Sonnenenergie, Windenergie, Wasserkraft, Biomasse, Gezeitenenergie, Geothermie) unterschieden.

### **Sekundärenergie**

Als Sekundärenergie wird die Energie bezeichnet, die durch technische Umwandlungsverfahren aus Primärenergie gewonnen wird. Im Umwandlungsprozess können die eingesetzten Energieträger einer grundlegenden Bearbeitung oder auch einer Änderung ihrer chemisch/physikalischen Struktur unterworfen werden z.B. Koks, Briketts, angereicherte Kernbrennstoffe, Benzin, Heizöl, Strom, Fernwärme etc.). Der Umwandlungsprozess ist notwendig, da der Primärenergieträger für die vielfältigen Anwendungen in seiner ursprünglich aus der Natur gewonnenen Form nicht eingesetzt werden kann. Beim Brenner eines Öl-Heizkessels z.B. wird extra-leichtes Heizöl benötigt, während die Schiffsmotoren schweres Heizöl verwenden.

### **Endenergie**

Die Endenergie ist die Energiemenge, die beim Endverbraucher z.B. für Heizung, Lüftung, Klimatisierung sowie für die Warmwasserbereitung zur Verfügung gestellt werden muss, um die festgelegte Innentemperatur und den Warmwasserbedarf über das Jahr sicherzustellen. Hierin ist auch die Hilfsenergie enthalten. Der vom Verbraucher zu entrichtende Preis richtet sich nach der bezogenen Endenergiemenge.

### **Nutzenergie**

Die Nutzenergie ist der Teil der Energie, der vom Nutzer nach Abzug aller Gewinnungs-, Umwandlungs- und Transportverluste einschließlich der Verluste durch die Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie zur Verfügung steht. Formen der umgewandelten Nutzenergie sind mechanische Arbeit, Wärme, Licht und Schall. Um zur letztlich gewünschten Energieanwendungsform der Nutzenergieebene zu gelangen, bedarf es meist einer Energieumwandlung des Energieträgers. Diese Energieumwandlung ist stets mit Verlusten verbunden. Die Höhe des Energieverlusts hängt im Wesentlichen vom Wirkungs- und Nutzungsgrad der Geräte ab.

## A.2 Wirkungsgrad und Nutzungsgrad

### Wirkungsgrad ( $\eta$ )

Der Wirkungsgrad ist eine dimensionslose Größe, welche die Güte der Energieumwandlung zu einem bestimmten Zeitpunkt der Umwandlung beschreibt. Je näher er sich bei 1 befindet, desto geringere Verluste treten bei der Energieumwandlung auf (Gleichung A.1)

$$\eta = \frac{\text{Nutzleistung}}{\text{zugeführte Leistung}} \quad (\text{A.1})$$

### Nutzungsgrad ( $n$ )

Der Nutzungsgrad, auch eine dimensionslose Größe, ist stets kleiner 1 und meist deutlich geringer als der Wirkungsgrad, da dieser häufig im günstigsten Punkt des Umwandlungsprozesses ermittelt wird. Der Wirkungsgrad und der Nutzungsgrad unterscheiden sich weiterhin darin, dass der Nutzungsgrad die Güte einer Energieumwandlung beschreibt, jedoch die Zeitspanne eines unstetigen Umwandlungsprozesses mit einbezieht (Gleichung A.2).

$$n = \frac{\text{Nutzenergie}}{\text{zugeführte Endenergie}} \quad (\text{A.2})$$

In der vorliegenden Arbeit wird der jährliche Energieverbrauch betrachtet. Aus diesem Grund wird in den Berechnungen zur Bestimmung der Nutzenergie der sogenannte „Jahresnutzungsgrad“ betrachtet, der sich auf ein Kalenderjahr bezieht. Der Jahresnutzungsgrad eines Heizkessels z.B. bilanziert die innerhalb eines Jahres an das Wärmeträgermedium Heizungswasser bzw. Warmwasser im Speicher abgegebene Energiemenge in Relation zur gesamten zugeführten Endenergie in Form von z.B. Heizöl oder Gas während desselben Zeitraums.

### A.3 Gradtagzahlen und Heizgradtage

Die jährliche Gradtagzahl (GTZ) und die jährlichen Heizgradtage (HGT) sind zwei verwandte Größen, die zur Bestimmung des Raumwärmebedarfs eines Gebäudes verwendet werden. Beide Größen werden in Kelvin-Tagen (Kd) angegeben.

Die jährliche Gradtagzahl (GTZ) für einen gegebenen Ort wird aus den gemittelten täglichen Außentemperaturen berechnet und stellt die klimatischen Gegebenheiten dieses Ortes dar [283]. Sie beschreibt in Abhängigkeit der festgelegten Heizgrenze den Einfluss des Klimas auf ein Gebäude und steht somit in Relation zu den Transmissionswärmeverlusten sowie den Lüftungsverlusten und damit dem jährlichen Energiebedarf für Raumwärme. Sie wird berechnet, indem man für jede gemittelte tägliche Außentemperatur unterhalb der Heizgrenze, die in Deutschland üblicherweise  $15^{\circ}\text{C}$  beträgt, die Differenz zwischen Innentemperatur ( $20^{\circ}\text{C}$ ) und Außentemperatur ermittelt und diese dann über das Jahr aufsummiert. Bei einer Außentemperatur von  $5^{\circ}\text{C}$  an 30 Tagen ergäbe sich somit beispielsweise ein Betrag von  $30\text{ d} \cdot 15\text{ K} = 450\text{ Kd}$  als Gradtagzahl. Nicht berücksichtigt werden Tage mit gemittelten Außentemperaturen, die die Heizgrenze überschreiten [283].

Zur Berechnung der Heizgradtage (HGT) werden die gemessene Außentemperatur und die gebäudespezifische Heizgrenztemperatur betrachtet. Da in diesem Fall die Heizgrenztemperatur abhängig ist von der Wärmedämmung sowie den Wärmegewinnen des spezifischen Gebäudes, kann die Heizgrenztemperatur von der normierten Heizgrenze ( $15^{\circ}\text{C}$ ) abweichen. Außerdem wird zur Berechnung der Heizgradtage eine Heizperiode (z.B. vom 1. September bis 31. Mai) betrachtet. Alle Tage, an denen die gemittelten Außentemperaturen oberhalb der Heizgrenztemperatur beziehungsweise außerhalb der Heizperiode liegen, finden keine Berücksichtigung. An 30 Tagen bei einer Außentemperatur von  $5^{\circ}\text{C}$ , einer Innentemperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  und einer Heizgrenztemperatur von  $12^{\circ}\text{C}$  ergäbe sich somit ein Betrag von  $30\text{ d} \cdot 7\text{ K} = 210\text{ Kd}$  als Heizgradtage.

## A.4 Nullenergiehaus und Passivhaus

### Passivhaus

Ein Passivhaus ist ein Gebäude, bei dem der Heizwärmebedarf so gering ist, dass es ohne zusätzliche Heizung funktioniert [284]. Um die geforderten niedrigen Energiekennwerte zu erreichen werden bei der Gebäudeplanung zwei Strategien verfolgt:

1. Wärmeverluste minimieren
2. Wärmegewinne optimieren

Gemäß Passivhaus-Institut Darmstadt muss ein Passivhaus in Mitteleuropa folgende Kriterien erfüllen:

Kennwert	Größe
Heizwärmebedarf	$\leq 15 \text{ kWh/m}^2 \cdot a$
Luftdichtheit	$\leq 0,6/h$ bei 50 Pa Druckdifferenz
Primärenergiebedarf	$\leq 120 \text{ kWh/m}^2 \cdot a$

Das Passivhaus kann durch zusätzliche Maßnahmen zu einem „Nullheizenergiehaus“ weiterentwickelt werden:

### Nullheizenergiehaus

Ein Nullheizenergiehaus ist ein Gebäude, dessen Jahresheizwärmebedarf in einem durchschnittlichen Jahr definitionsgemäß 0 ist. In einem solchen Haus darf daher auch am kältesten Tag kein Bedarf an Notheizung anfallen [285].

## A.5 Allgemeine Begriffe

### Haus-Archetypen

Haus-Archetypen sind repräsentative Mustergebäude, welche eine bestimmte Menge an Gebäuden im gesamten Wohnungssektor repräsentieren. Ein Haus-Archetyp wird üblicherweise nach Gebäudetyp (Einfamilienhaus, Zweifamilienhaus, oder Mehrfamilienhaus), Altersgruppe und Klimaregion bestimmt.

### Genauigkeit

Genauigkeit wird hier definiert als die Nähe der von einen Energiemodellen erlangten Ergebnisse zum „wahren“ Wert. In diesem Fall bezieht sich der „wahre“ Wert auf die Endenergieverbrauchsdaten vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [64].

### **Übertragbarkeit**

Übertragbarkeit wird hier definiert als die Fähigkeit eines Modells, den Endenergieverbrauch eines beliebigen Landes zu bestimmen, auch wenn es ursprünglich nicht für dieses Land entwickelt worden ist.

### **Wahrscheinlichkeitsverteilung**

Als Wahrscheinlichkeitsverteilung wird hier als eine statistisch bekannte Funktion (Normalverteilung, Weibull-Verteilung, Beta-Verteilung oder Dreiecksverteilung) verstanden, welche die möglichen Variationen eines Wahrscheinlichkeitsfaktors beschreiben kann.

## **A.6 Bauphysikalische Begriffe**

### **Außentemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )**

Die Außentemperatur ist die Außenlufttemperatur, die auf Grundlage meteorologischer Messungen und Auswertungen ermittelt und für die Berechnung der Raumwärme verwendet wird [251].

### **Heizgrenztemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )**

Die Heizgrenztemperatur (Basistemperatur) ist die Außentemperatur, ab der in Gebäude bei einer vorgegebenen Innentemperatur nicht mehr beheizt wird [251].

### **Infiltration**

Unter Infiltration versteht man den Luft-Leckagestrom durch die Gebäudehülle nach innen infolge von Undichtheiten [251].

### **Innentemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )**

Die Innentemperatur ist die angestrebte Raumlufttemperatur im Inneren eines Gebäudes, die der Ermittlung des Raumwärmebedarfs zugrunde gelegt wird. Sie ist eine planerische Festlegung [251].

### **Luftwechselrate ( $1/h$ )**

Die Luftwechselrate  $n$  gibt an, wie oft pro Stunde das gesamte Raumvolumen gegen Frischluft ausgetauscht wird. Bei einer Luftwechselrate  $n = 2h^{-1}$  wird die Raumluft 2 mal pro Stunde gegen Außenluft ausgetauscht [286].

### **Nutzflächenspezifischer Wärmeverlust $h$**

Der nutzflächenspezifische Wärmeverlust ist der Quotient aus der Summe der Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste ( $H_V + H_T$ ) und der Energiebezugsfläche  $A_{EB}$ .  $h =$



$\frac{H_T + H_V}{A_{EB}}$ . Hierbei ist die Energiebezugsfläche die beheizte Wohnfläche oder „Gebäudenutzfläche“ nach EnEV.

**Wärmetransferkoeffizient für Lüftung  $H_V$  ( $W/K$ )**

Der Lüftungswärmeverlust ist der durch Luftwechsel bedingte Wärmestrom von einem beheizten Raum nach außen je Kelvin Temperaturdifferenz [251].

**Wärmetransferkoeffizient für Transmission  $H_T$  ( $W/K$ )**

Der Wärmetransferkoeffizient für Transmission ist der Wärmestrom durch die Außenbauteile je Kelvin Temperaturdifferenz. Durch den Bezug auf die gesamte wärmeübertragende Umfassungsfläche beschreibt dieser Kennwert die energetische Eigenschaft der Gebäudehülle [251].

**Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  ( $W/m^2 \cdot K$ )**

Der Wärmedurchgangskoeffizient (auch U-Wert genannt) gibt an, welcher Wärmestrom in Watt pro  $m^2$  zwischen zwei Medien übertragen wird, die durch eine oder mehrere feste Schichten voneinander getrennt sind, wenn der Temperaturunterschied in Richtung des Wärmestroms zwischen den Medien ein Kelvin beträgt [251].

**effektive Wärmekapazität  $C$  ( $J/K$ )**

Die effektive Wärmekapazität ist eine von der Beschaffenheit des Stoffes abhängige Größe, sie kann als Materialkonstante angesehen werden. Die effektive Wärmekapazität entspricht der Wärmemenge, die nötig ist, um einen Stoff um 1 Kelvin zu erwärmen [287].



## B Erklärungen

### B.1 Auswirkungen der Wärmeschutzverordnung bzw. Einsparenergieverordnung auf Neubauten, basierend auf: [68, 221, 288-292]

Zeitraum	Erklärung
1859-1957	In diesen Zeitraum gab es keine gesetzlichen Regelungen zum Bauen. Die Gebäude wurden, basierend auf Erfahrungen (handwerklich geprägte Bautechniken) mit lokal verfügbaren Materialien der Region erbaut. Die Ausdehnung und die zunehmende Industrialisierung der Städte hatten die Weiterentwicklung der Baustoffherstellung sowie die Verwendung von kostengünstigen Materialien zur Folge.
1958-1976	Wärmeschutz-Norm (DIN 4108 - Wärmeschutz im Hochbau); erste Regeln zu Wärmedämmqualitäten eines Gebäudes mit besonderer Berücksichtigung bauphysikalischer Aspekte und Vermeidung von Wärmebrücken (insbesondere bei auskragenden Betonbauteilen); in der DDR sind Plattenbauten in Großserien sowie Kohle-, Öl- und Gas-Zentralheizungen oder Fernwärme Standard.
1977-1983	1. Wärmeschutzverordnung (WärmeschutzvV 77); Sie wurde als Folge der Ölkrise entwickelt. Hierbei wurden erstmals Mindestdämmwerte für Bauteile vorgeschrieben. Auf dem Markt wurden verbesserte wärmetechnische Anforderungen (auch in der DDR) z.B. bei monolithischen Wänden durch Wärmedämmung.
1984-1994	2. Wärmeschutzverordnung (WärmeschutzvV 84); Begrenzung der Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit des A/V Verhältnisses (Verhältnis der wärmeübertragenden Umfassungsfläche zum hiervon eingeschlossenen Bauwerksvolumen). Eine Verbesserung der Qualität von Dämmmaterialien wurde auf dem Markt als Folge wahrnehmbar.
1995-2001	3. Wärmeschutzverordnung (WärmeschutzvV 95); Sie begrenzt den Jahres-Heizwärmebedarf für Neubauten (in Abhängigkeit vom A/V Verhältnisses) und hatte die Einführung eines „Wärmebedarfsausweises“ zur Folge. Außerdem wurde in der Wärmeschutzverordnung die regelmäßige Überprüfung von Heizungsanlagen berücksichtigt.
2002-2006	Energieeinsparverordnung (EnEV 2002); Sie hatte die Reduzierung des Energiebedarfs um 30% gegenüber der WSchV 1995 zur Folge. Der zulässige Jahres-Primärenergieverbrauch für Heizung und Warmwasserbereitung wurde begrenzt. Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz der Gebäude wurden formuliert und die Dämmung von Heizungs- und Heißwasserleitungen sowie (unter bestimmten Voraussetzungen) die Dämmung der obersten Geschossdecke wurden verpflichtend.
2007-2009	Energieeinsparverordnung (EnEV 2007); Energieausweise wurden auch bei Sanierung von Bestandsgebäude zur Pflicht. Außerdem erfolgte die Einführung eines Verfahrens zur energetischen Bewertung von Nichtwohngebäuden (Referenzgebäudeverfahren). Hierbei wurden alternative Energieversorgungssysteme sowie die energetische Inspektion von Klimaanlagen verpflichtend.
2009-2014	Energieeinsparverordnung (EnEV 2009); Anforderung zur Senkung des Jahresprimärenergiebedarfs um 30% gegenüber EnEV 2007 (bis 60 kWh/m²a) sowie einer 15% besseren Dämmung der Gebäudehülle bei Neubauten. Außerdem wurden die Klimaschutzziele der Bundesregierung (Minderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen) berücksichtigt, indem bei Neubauten CO <sub>2</sub> -Emissionen im Betrieb berechnet werden.



## C Abgeleitete Daten

### C.1 Unterteilung des Endenergieverbrauchs nach Nutzungsbereichen

**Tab. C.1:** Langfristige Entwicklung des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor

Jahr	Endenergieverbrauch im Wohnungssektor nach Nutzungsbereichen (TWh/a)					
	Summe	Raumwärme	Warmwasser	Kochen	Elektrogeräte	Beleuchtung
1990	662	540	61	18	34	9
1991	699	567	66	20	37	10
1992	677	544	65	20	38	10
1993	727	581	71	22	42	11
1994	711	563	72	22	43	10
1995	737	580	77	24	46	11
1996	803	629	86	26	49	12
1997	793	613	88	28	53	11
1998	773	598	84	28	52	11
1999	726	554	82	28	51	12
2000	718	545	81	28	52	11
2001	784	609	82	29	53	11
2002	747	574	80	29	53	11
2003	764	582	84	31	56	11
2004	732	553	83	31	54	11
2005	720	539	82	33	55	11
2006	728	541	84	34	59	11
2007	627	451	75	32	59	10
2008	711	509	94	39	56	12
2009	688	489	93	39	55	12
2010	743	549	90	38	54	12
2011	648	433	106	40	57	13
2012	674	460	104	40	57	13
2013	723	499	113	41	58	13

 Eigene Berechnungen basierend auf Polynominterpolation der vorhandenen Daten zwischen 1996-2013

 Angepasste Daten basierend auf BMWi [64] und Öko - Institut und FhG-ISI [147].

 Publierte Daten des BMWi [64]

Zur Unterteilung des Endenergieverbrauchs im deutschen Wohnungssektor nach Nutzungsbereichen (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung) wurden zwei Hauptquellen (BMWi [64] und Öko-Institut und FhG-ISI [147]) verwendet. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) hat Daten der gesamten Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Wohnungssektor ab dem Jahr 1990 (zweite Spalte in Tab. C.1) publiziert. Daten mit der Unterteilung des Endenergieverbrauchs nach Nutzungsbereichen wurden jedoch erst ab dem Jahr 2008 ermittelt und veröffentlicht. Für den Zeitraum von 1996–2007 ermittelten das Öko-Institut und das Fraunhofer-ISI [147] im Jahr 2011 in der Studie „Energieeffizienz in Zahlen“ Informationen zum Endenergieverbrauch im Wohnungssektor nach Nutzungsbereich (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung) (Tab. C.2).

**Tab. C.2:** Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Nutzungsbereichen im deutschen Wohnungssektor für den Zeitraum 1996–2007 nach Öko-Institut und Fraunhofer-ISI [147]

Jahr	Endenergieverbrauch (TWh/a)	Endenergieverbrauch nach Nutzungsbereichen (%)				
		Raumwärme	Warmwasser	Kochen	Elektrogeräte	Beleuchtung
1996	818	78,4	10,7	3,3	6,1	1,5
1997	780	77,3	11,0	3,6	6,7	1,4
1998	773	77,4	10,9	3,6	6,7	1,4
1999	747	76,3	11,2	3,9	7,0	1,6
2000	733	76,0	11,3	4,0	7,2	1,5
2001	774	77,6	10,5	3,7	6,7	1,4
2002	761	76,8	10,7	3,9	7,1	1,4
2003	781	76,2	11,0	4,1	7,3	1,4
2004	754	75,6	11,3	4,2	7,4	1,5
2005	746	74,9	11,4	4,6	7,6	1,5
2006	733	74,3	11,5	4,6	8,1	1,5
2007	660	71,8	12,0	5,2	9,4	1,7

Da die Abweichung der Ergebnisse zum gesamten Endenergieverbrauch zwischen den vom Öko-Institut und dem Fraunhofer-ISI [147] veröffentlichten Daten und den vom BMWi publizierten Daten kleiner als 5% ist, wurden in der vorliegenden Arbeit beide Datenquellen verwendet, um den Endenergieverbrauch nach Nutzungsbereichen zu bestimmen. Hierbei wurden die publizierten Ergebnisse des Endenergieverbrauchs des BMWi (linke Spalte in Tab. C.1) für den Zeitraum 1996–2007 mit den Prozentanteilen des Endenergieverbrauchs in den einzelnen Nutzungsbereichen (rechte Spalten in Tab. C.2) umgerechnet. Die grünen Zellen in Tab. C.1 zeigen die Ergebnisse der Berechnung. Für den Betrachtungs-

tungszeitraum 1990–1995 sind keine Daten zum Endenergieverbrauch im Wohnungssektor nach Nutzungsbereichen (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung) verfügbar. Der Grund, dass es für diesen Zeitraum keine Daten gibt, die den Endenergieverbrauch im deutschen Wohnungssektor beschreiben, besteht darin, dass im Zeitraum 1994–1995 keine Anwendungsbilanzen erstellt und für den Zeitraum 1990–1993 im Wesentlichen nur Bilanzen für die alten Bundesländer erhoben wurden [147]. Deshalb wurden, um den gesamten „Referenzzeitraum“ von 1990 bis 2000 abbilden zu können, die Daten für den Zeitraum zwischen 1990 und 1995 die einzelnen Nutzungsbereichen durch eine Polynominterpolation der vorhandenen Daten ergänzt (blaue Zellen in Tab. C.1).

## C.2 Entwicklung des Nutzungsgrades

In der vorhandenen Literatur gibt es keine Studie, die Daten zur Entwicklung der Nutzungsgrade der Anlagen und Geräte im Wohnungssektor im Zeitraum von 1990 bis 2010 beinhaltet. Zur Bestimmung der Entwicklung des Nutzungsgrades von Anlagen und Geräten in Deutschland wurden daher Daten von insgesamt zwölf Studien (Tab. C.3) herangezogen. Die Ergebnisse dieser Datenauswertung werden in Tab. C.3 zusammengefasst. Die existierenden Studien [154, 156–171] liefern hierbei Daten zum Stand der Technik (Nutzungsgrad) bezogen auf bestimmte Jahre, meistens in Bezug auf das Publikationsjahr, aber keine langfristige Entwicklung.

Aus Tab. C.3 wird ersichtlich, dass die Werte des Nutzungsgrades verschiedener Studien nicht immer übereinstimmen. Diese Diskrepanz liegt begründet im unterschiedlichen Zweck bzw. Kontext, welcher die Durchführung der Studien bestimmte. Zum Beispiel hatte die Studie von Hauser und Hausladen im Jahr 1990 [160] die Entwicklung eines Energiepasses (in Bezug auf den Endenergieverbrauch je Wohnfläche ( $KWh/m^2a$ )) zum Ziel. Aus diesem Grund wurden detaillierte Daten zum Nutzungsgrad der verschiedenen Heizanlagen benötigt. Im Gegensatz dazu hatte die Studie von Tzscheutschler et al. [245] die Ermittlung der gesamten Entwicklung des Primärenergiebedarfs, des Endenergiebedarfs und der Nutzenergie in Deutschland von 1990 bis 2007 zum Ziel. Daraus folgt, dass für diese Studie detaillierte Informationen zum Nutzungsgrad aufgegliedert für jeden Heizkessel nicht zwingend notwendig waren und somit die Daten nicht nach Energiequellen aufgeschlüsselt, sondern zusammengefasst vorliegen. Daraus ergibt sich eine geringe Detailgenauigkeit im Gegensatz zur Studie nach Hauser und Hausladen. Einen anderen Grund für die voneinander abweichenden Werte liefern die verschiedenen Stichproben, auf denen die Studien basieren, was zu unterschiedlichen Ergebnissen führt.

**Tab. C.3:** Angaben zum Jahresnutzungsgrad von Geräten zur Energienutzung im Wohnungssektor in Deutschland, entsprechend der verwendeten Endenergie

Jahr der Datenerhebung	Jahresnutzungsgrad Raumwärme (%)						Jahresnutzungsgrad Warmwasser (%)						Jahresnutzungsgrad Kochen (%)		Jahresnutzungsgrad Beleuchtung (%)
	Heizöl	Gas	Strom	Fernwärme	Kohle	Sonstige inkl. erneuerbaren Energien	Heizöl	Gas	Strom	Fernwärme	Kohle	Sonstige inkl. Erneuerbare	Gas	Strom	Strom
1990	55-70	55-80	80		45										
1993	80	80	94-98		70		75	75	90-99		70				
1996	65-90				45-65			25-85							
1997	71-93	65-99	95-98	90-98	51-77		29-89	33-91	96-99	90-98					
1999															7,9
2000	85	85	99		65		80	95		84,9	85	65	100		
2003	75,2	79,3	99	98	79,1	79									
	73-90	65-80													
2004	65-90	70-90					60	85	90-95						5
2005	71-88	71-93					56-83	57-86							
	83						63	69	92	78	52	57		100	
2007	78,6						51,9*								7,3
2009			99	98	65										
2010	85	86	99	100		86						86			
	Hauser und Hausladen, 1990 [154]														
	Hauser und Hausladen, 1993 [160]														
	Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e.V., 1996 [155]														
	IWU, 1997 [156]														
	Wagner et al, in Wüstenrot Stiftung 2010 [157]														
	Joos (Hrsg), 2004 [158]														
	Loga et al., 2005 [159]														
	PROBAS, UBA 2013 [162]														
	Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2009a [161]														
	Öko Institut und Prognos 2009 [163]														
	Tzcheutscherler et al. 2009 [243]														
	Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2009b [166]														
	* Prozesswärme inklusive Warmwasser														

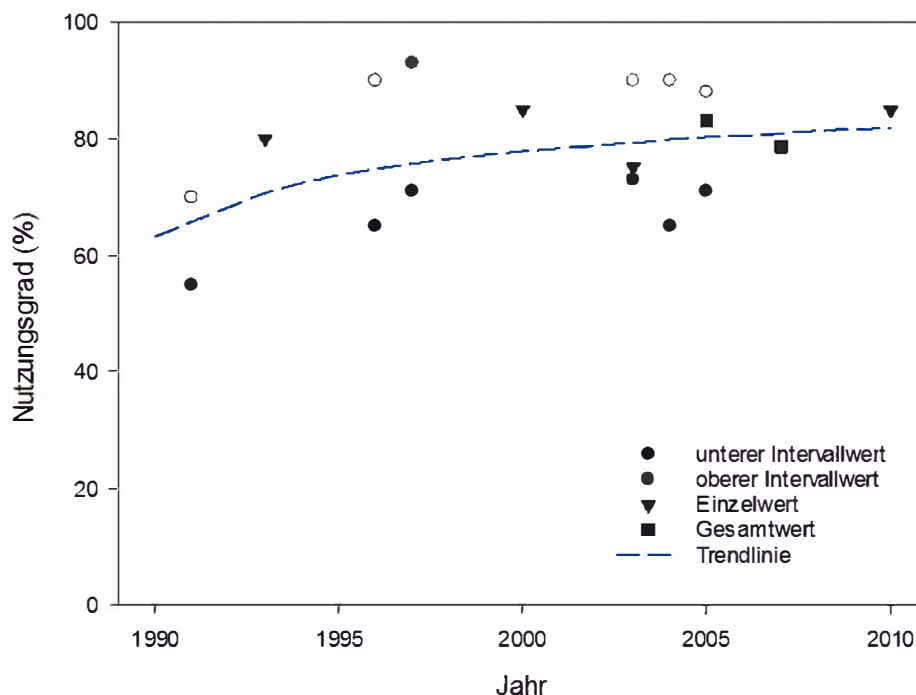


Obwohl die Werte für die Nutzungsgrade von Anlagen und Geräten der verschiedenen Studien nicht immer übereinstimmen, ist mit der Zeit eine deutliche Verbesserung zu beobachten. Außerdem ist festzustellen, dass eine ausreichende Datenbasis vorhanden ist, um repräsentative Sättigungskurven, insbesondere für Raumwärme, entwickeln zu können. Dies garantiert, dass zukünftige Prognose der gesamten Nutzenergie sich im gleichen Bereich wie der tatsächliche Verbrauch befinden, da die Raumwärme im Wohnungssektor drei Viertel der gesamten Nutzenergie ausmacht [210].

Die Entwicklung des Nutzungsgrades für jede Energienutzung bzw. jede Energiequelle, die in Tab. C.3 dargestellt wird, wird auf den folgenden Seiten beschrieben und durch Abbildungen verdeutlicht. Außerdem werden die Kriterien zur Ermittlung der Nutzungsgrade definiert und die Entwicklung durch eine entsprechende Sättigungskurven dargestellt.

In den folgenden Abbildungen werden für unterschiedliche Daten vier verschiedene Symbole (weißer Kreis, schwarzer Kreis, Dreieck, und Quadrat) verwendet. Teilweise liefern Studien Daten in Form eines Bereiches, d.h. für einen variierenden Nutzungsgrad, wie z.B. die Studie von Hauser und Hausladen (1990) [160]. Diese Studie zeigt, dass z.B. der Nutzungsgrad von Ölheizungsanlagen zwischen 55 und 70% variiert. In diesem Fall wird der untere Intervallwert (55%) mit einem schwarzen Kreis dargestellt und der obere (70%) mit einem weißen Kreis. Wird in der betreffenden Studie nur ein einzelner Wert zum Nutzungsgrad jeder Energiequelle angegeben, wie bei Hauser und Hausladen (1993) [161] (z.B. Nutzungsgrad bei Ölheizungsanlagen im Jahr 1993: 80%), wird dieser Wert mit einem Dreieck abgebildet. Wenn eine Studie Daten oder Referenzdaten zum gesamten Nutzungsgrad liefert, d.h. der Nutzungsgrad nicht nach der Energiequelle aufgeschlüsselt ist, wie in den Studien vom Öko-Institut und Prognos (2009) [154] (z.B. Gesamtnutzungsgrad für Raumwärme im Jahr 1993: 83%), wird dieser Wert mit einem Quadrat dargestellt.

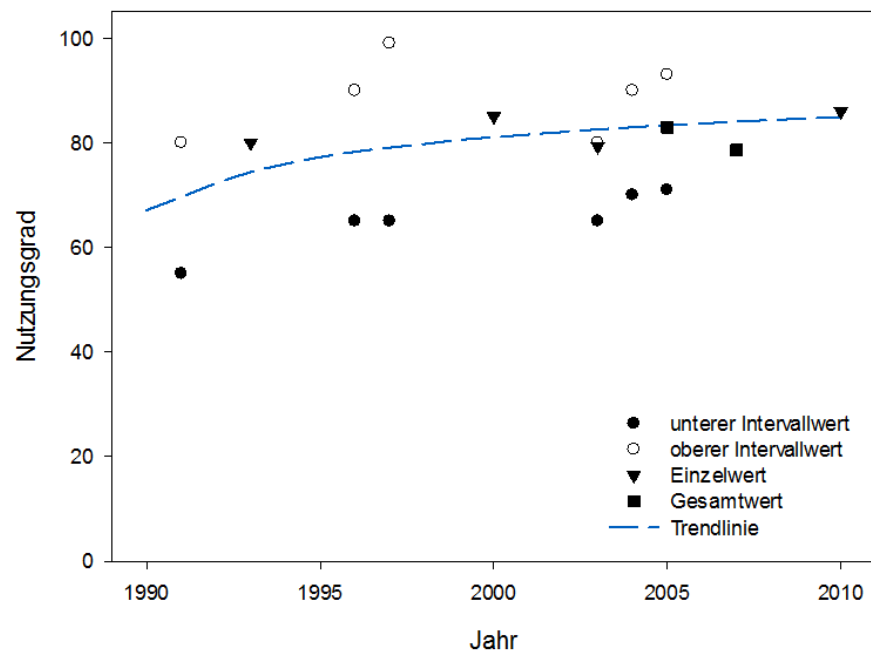
Um die Entwicklung des Nutzungsgrades zur Bereitstellung von Raumwärme durch Ölheizungen (Abb. C.1) darzustellen, wurden aus den in den Studien von Hauser und Hausladen [160], IWU [165], Wagner et al. [167], Joos [163] und Loga et al. [164] angegebenen Nutzungsgradbereichen Mittelwerte gebildet. In der hieraus resultierende Sättigungskurve werden neben diesen Mittelwerten die individuellen Werte der Studien von Hauser und Hausladen [161], FfE [156] und von PROBAS [169] berücksichtigt. Es ist eine deutliche Tendenz zur Verbesserung des Nutzungsgrades der Geräte zu beobachten, die in zwei Phasen unterteilt ist. Die erste Phase stellt eine starke Verbesserung des Nutzungsgrades über den Zeitraum 1990–1997 dar; die zweite Phase (1998–2010) zeigt eine langsame jährliche Verbesserung. Im Jahr 2010 erreichte der mittlere Nutzungsgrad der Heizkessel für Öl einen Wert von 85% [169]. Die Streuung der Mittelwerte aller Studien in Bezug auf den hieraus abgeleiteten Trend beträgt nicht mehr als 13%. Dies zeigt, dass eine signifikante Ähnlichkeit der Werte vorhanden ist.



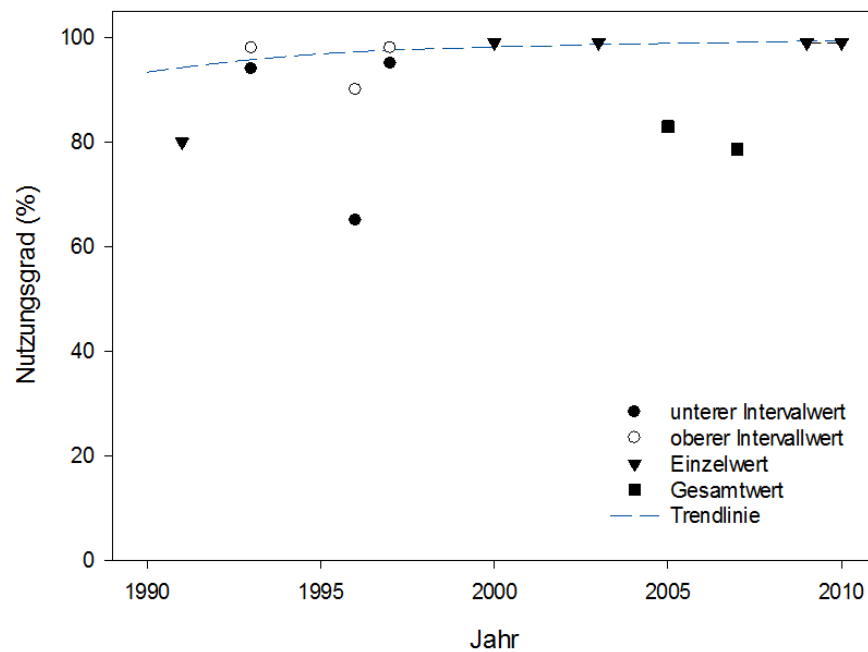
**Abb. C.1:** Entwicklung des Nutzungsgrades von Ölheizungsanlagen

Zur Entwicklung der Sättigungskurve für die Entwicklung des Nutzungsgrades von Gasheizungsanlagen (Abb. C.2) wurden Werte aus den Studien von Hauser und Hausladen [160, 161], IWU [164], Wagner et al. [167], Joos [163] und Loga et al. [164] berücksichtigt. Die Tendenzwerte sind dabei sehr nah an den individuellen Werten (der Mittelwert der Standardabweichung liegt bei 9%). Das bedeutet, dass ein hohes Maß an Übereinstimmung zwischen den Mittelwerten aller Studien und der ermittelten Trendlinie vorhanden ist. Zum Beispiel erreichte der Nutzungsgrad der Geräte im Jahr 2010 nach PROBAS [169] einen Wert von ca. 86%. Nach der Trendlinie liegt der Nutzungsgrad bei 85%.

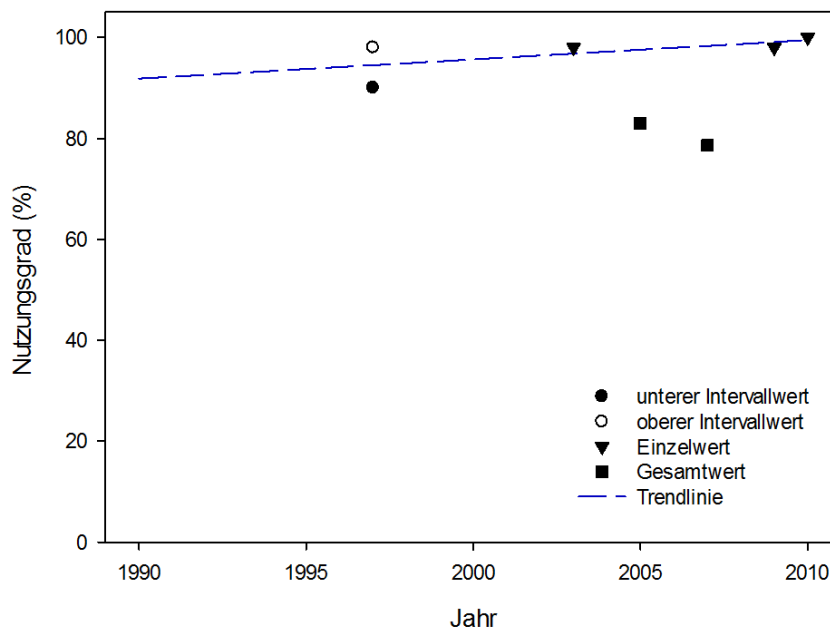
Zur Entwicklung des Nutzungsgrades von Elektroheizgeräten (Abbildung C.3), geben zwei unterschiedliche Studien von Hauser und Hausladen [160, 161] an, dass im Jahr 1990 für Raumheizungen mit elektrischem Strom ein durchschnittlicher Nutzungsgrad von ca. 80% erreicht wurde, während entsprechend ihrer Angaben im Jahr 1993 der Nutzungsgrad der Geräte zwischen 94 und 98% variierte. Da eine solch signifikante Veränderung innerhalb von drei Jahren als unwahrscheinlich anzusehen ist, kann davon ausgegangen werden, dass für die Ermittlung des durchschnittlichen Nutzungsgrades von verschiedenen Rahmenbedingungen (im Wesentlichen unterschiedlichen Stichproben) ausgegangen worden ist. Im Gegensatz dazu steht die Studie, die von der Gesellschaft für Rationelle Energieverwen-



**Abb. C.2:** Entwicklung des Nutzungsgrades von Gasheizungsanlagen



**Abb. C.3:** Entwicklung des Nutzungsgrades von Elektroheizgeräten



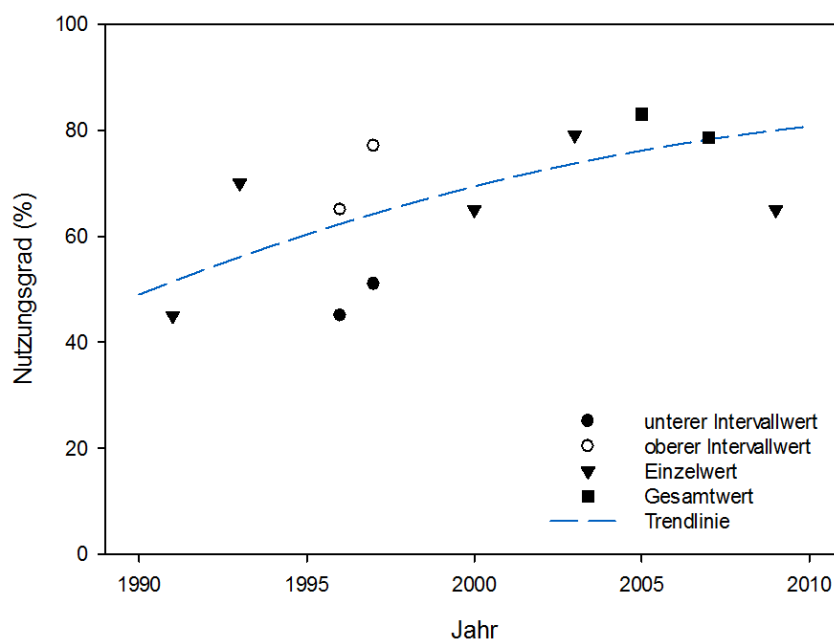
**Abb. C.4:** Entwicklung des Nutzungsgrades von Fernwärmeheizungen

dung [159] durchgeführt wurde. Nach dieser Studie beträgt für alle Geräte zur Raumheizung (inklusive solcher, die mit Strom betrieben werden) der maximale Nutzungsgrad bis zu 90%. Die Werte dieser Studie werden nur als Referenzdaten berücksichtigt, da die Grenzwerte des Bereichs auch Daten zu Ölheizungen und Kohleheizungen enthält und daher in diesem Zusammenhang nicht repräsentativ sind. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit angenommen, dass der Nutzungsgrad im Zeitraum 1994–1996 höher als 90% lag. Nach 1997 bekräftigen alle Studien, dass der Nutzungsgrad für Heizungsanlagen mit elektrischem Strom einen Wert höher als 95% verzeichnete und in den Jahren 2009 und 2010 ein Nutzungsgrad von ca. 99% erreicht wurde [157, 169]. Der Mittelwert der Standardabweichung beträgt in diesem Fall etwa 4%. Anzumerken ist jedoch, dass der Bereich von 65–90% nach der Studie der Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung alle Geräte berücksichtigt, d.h. Geräte mit niedrigem Nutzungsgrad wie Geräte, die mit Kohle betrieben werden, sind in diesem Bereich mit inbegriffen. Wenn diese Studie nicht berücksichtigt wird, sinkt die Standardabweichung auf 2%.

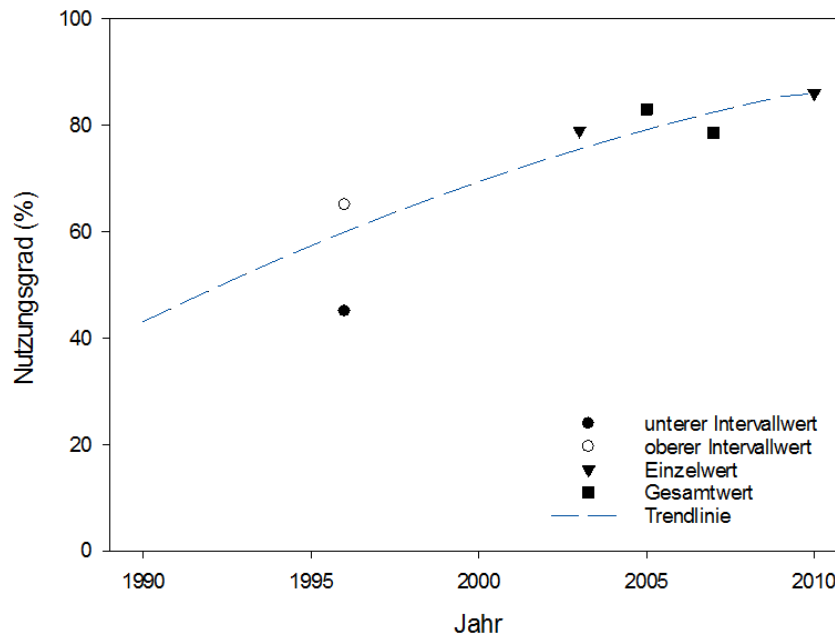
Fernwärme gilt als eines der effizientesten Heizsysteme der Welt [170]. Nach dem Institut für Wohnen und Umwelt [165] betrug der Nutzungsgrad der Fernwärme im Jahr 1997 zwischen 90–98% (Abb. C.4). Die Studien von FfE(b) [157] und PROBAS [169] zeigen, dass in den Jahren 2009 und 2010 der Nutzungsgrad zwischen 98% und 100% lag. Zudem ist

anzumerken, dass die Bestimmung des Nutzungsgrades erst ab der Wärmeübertragungsstation (dem Punkt, an dem das Fernwärmenetz ins Haus übertragen wird) erfolgt und der Nutzungsgrad nicht das Gesamtsystem des Fernwärmenetzes berücksichtigt. Diese letzte Aussage erklärt den hohen Wert des Nutzungsgrades von Fernwärmeheizungsanlagen. Aufgrund dessen ist nicht davon auszugehen, dass diese Art der Heizsysteme den niedrigsten Verlust bezüglich der Energieumwandlung aufweist, da der größte Verlust der Energieumwandlung des gesamten Systems vor der Wärmeübertragungsstation zu verzeichnen ist.

In der vorliegenden Arbeit wird angenommen, dass im Jahr 1997 ein Nutzungsgrad von Fernwärmeheizungsanlagen von ca. 94% erreicht wurde (Mittelwert des Nutzungsgradbereichs nach einer Studie des IWU [165]). Für die Jahre 2003 und 2009 wird ein Nutzungsgrad von 98% angegeben [156, 157] und für 2010 ein Wert von 100% [169]. Dieser Wert wird nur als Referenzwert verwendet, da er sich nur auf Mustergeräte bezieht. Die geringsten Übereinstimmungen zwischen der Sättigungskurve und den individuellen Werten sind im Jahr 2005 und 2007 vorhanden (Mittelwert der Standardabweichung 11% bzw. 14%). Diese beiden Werte werden aber nur als Referenzdaten mit dargestellt. Ohne die Berücksichtigung dieser Werte beträgt der Mittelwert der Standardabweichung weniger als 2%.



**Abb. C.5:** Entwicklung des Nutzungsgrades von Kohlekesseln

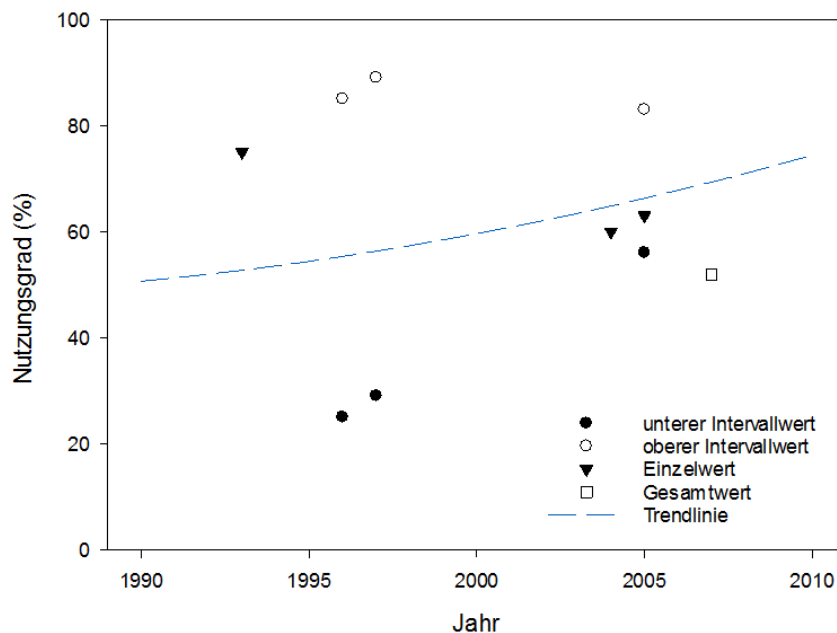


**Abb. C.6:** Entwicklung des Nutzungsgrades von Heizungsanlagen betrieben mit sonstigen inkl. erneuerbaren Energien

Zur Entwicklung einer repräsentativen Trendlinie, welche die Verbesserung des Nutzungsgrades bezüglich der Raumwärmebereitstellung mit Kohle (Abb. C.5) ausdrückt, werden Werte aus der Studie von Hauser und Hausladen [160, 161] herangezogen. Nach dieser Studie betrug der Nutzungsgrad im Jahr 1991 ca. 45% und in der folgenden Periode ca. 79% [156]. Laut FfE (b) [157] lag der Nutzungsgrad im Jahr 2009 bei ca. 65%. Dies impliziert, dass eine Sättigungskurve, die diesen Wert berücksichtigt, theoretisch eine Verschlechterung des Nutzungsgrades der Geräte, die mit Kohle betrieben werden, darstellen würde. Die Sättigungskurve in Abb. C.5 zeigt einen Nutzungsgrad von 49% im Jahr 1990 und ca. 79% im Jahr 2010. Die Werte der Sättigungskurve stimmen mit den Studien von IWU [156] und FfE (a) [161] überein. Weiterhin bekräftigt die Studie FfE (b) [166] zum einen die Verbesserung des Nutzungsgrades im Vergleich zum Jahr 1990 und zum anderen, dass in den letzten zehn Jahren der Nutzungsgrad einen Wert von mehr als 65% hatte. Eine durchschnittliche Standardabweichung von 13% belegt, dass Sättigungskurve trotz der Schwierigkeit bezüglich der Entwicklung des Nutzungsgrades am Ende des Jahrzehntes eine deutliche Ähnlichkeit zu den einzelnen Werten der untersuchten Studien aufweist.

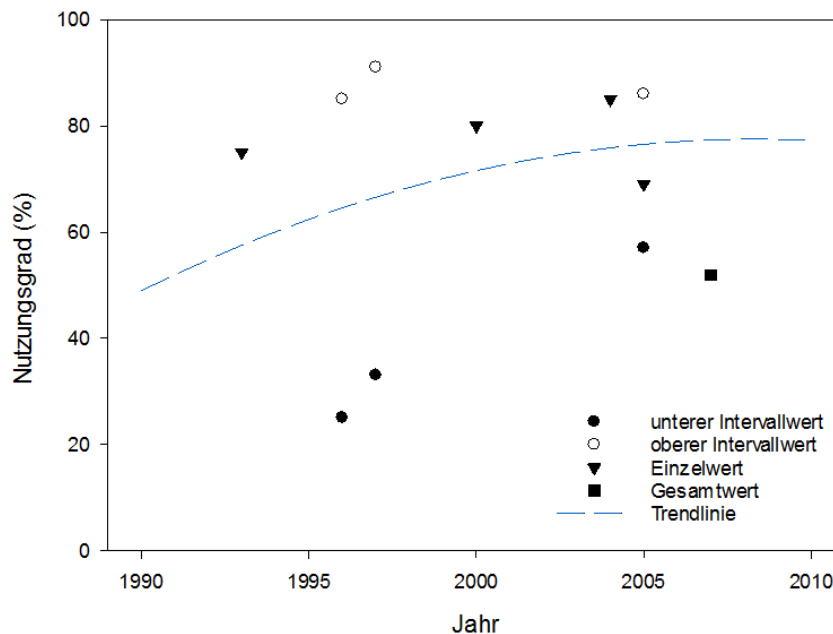
Unter der Bezeichnung Sonstige, inkl. erneuerbaren Energiequellen, werden in Abb. C.6 Holz, Pellets und Solarthermische Energie zusammengefasst. Die ersten Daten sind der

Studie der Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e.V. [159] entnommen. Diese Daten liefern Informationen zum Nutzungsgradbereich für Kohle und erneuerbare Energien. Nach dieser Studie besitzt der Nutzungsgrad einen unteren Wert von 45% und einen oberen Wert von 65%. Außerdem zeigt die Studie von FfE (a) [156], dass der Nutzungsgrad im Jahr 2003 ca. 79% betrug. Auf Basis dieser beiden Studien und den Werten von Öko-Institut und Prognos [154] wurde eine Trendlinie entwickelt. Der finale Wert der Sättigungskurve stimmt mit dem Wert der Studie von PROBAS [169] überein. Es sei hervorgehoben, dass die Verbesserung des Nutzungsgrades in diesem Bereich hauptsächlich in der Änderung der Energiequelle (Reduktion der Holznutzung und Umstellung der Systeme auf Solarenergie oder anderen erneuerbare Energien) begründet liegt.



**Abb. C.7:** Entwicklung des Nutzungsgrades von Warmwasseranlagen betrieben mit Öl

Die Sättigungskurve, die die Entwicklung des Nutzungsgrades im Bereich Warmwasseranlagen (Abb. C.7), betrieben mit Öl, beschreibt, basiert auf folgenden Daten: Nach IWU [165] betrug der Nutzungsgrad der Heizkessel, die mit Öl betrieben wurden, im Jahr 1997 zwischen 29% und 89%. Daraus folgt ein Mittelwert des Nutzungsgrads von 59%. Im Gegensatz dazu steht die Studie von Hauser und Hausladen [161] mit einem Nutzungsgrad von 75% im Jahr 1993. Dieser Widerspruch (Verschlechterung der Geräteeffizienz) wird durch die Betrachtung der Studie von Loga et al. [164] gelöst. Nach Loga et al. betrug der Nutzungsgrad zwischen 56% und 83% (Mittelwert 70%), d.h. diese Studie belegt, dass eine Verbesserung der Nutzungsgrades vorhanden ist und dass der Nutzungsgrad im



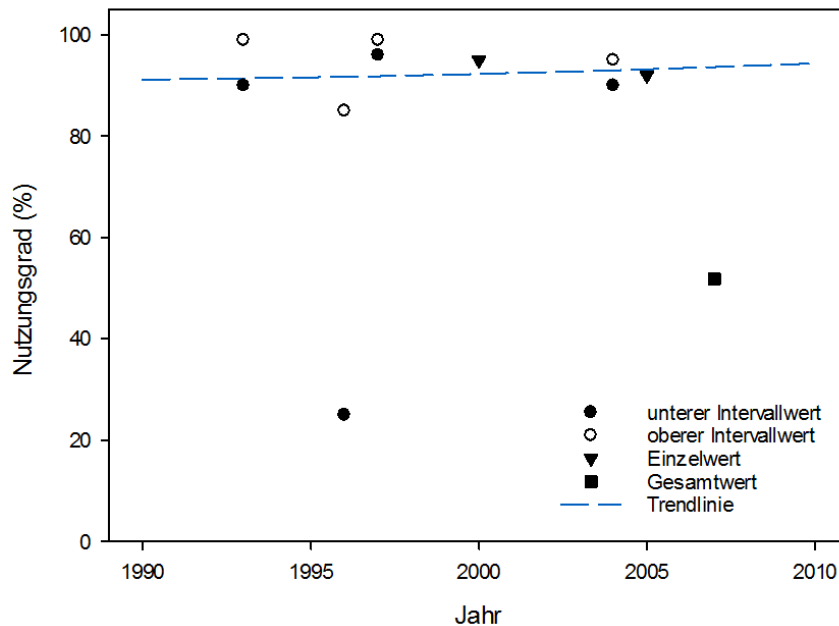
**Abb. C.8:** Entwicklung des Nutzungsgrades von Warmwasseranlagen betrieben mit Gas

Zeitraum von 1997 bis 2005 angestiegen ist. Zur Ermittlung der Sättigungskurve werden neben diesen Studien die Werte von Joos et al. [163] und Öko-Institut und Prognos [154] berücksichtigt. Die geringsten Übereinstimmungen zwischen der Sättigungskurve und den individuellen Werten sind im Jahr 1996 und 1997 vorhanden (Mittelwert der Standardabweichung 35% bzw. 37%).

Zur Darstellung der Entwicklung des Nutzungsgrades im Bereich Warmwasseranlagen betrieben mit Gas (Abb. C.8) wurden Durchschnittswerte berücksichtigt, welche den Studien IWU [165] und Loga et al. [164] entnommen wurden. Diese Studien zeigen, dass für die Jahren 1997 und 2005 Nutzungsgradwerte von 62% bzw. 72% erreicht wurden. Weiterhin wurden Einzeldaten aus den Studien von Hauser und Hausladen [164], und Joos [163] dem Datensatz hinzugefügt. Mit Hilfe dieser Daten wurden eine Polynom-Regression durchgeführt. Die resultierende Sättigungskurve beschreibt die Verbesserung des Nutzungsgrades für den gesamten Zeitraum (1990–2010). Ausgehend von dieser Sättigungskurve beträgt der Wert für den Nutzungsgrad im Jahr 1990 ca. 48% und im Jahr 2010 ca. 77%.

In Abb. C.8 ist zu sehen, dass starke Abweichungen zwischen der Sättigungskurve und den einzelnen Werten der Studien vorhanden sind. Zum Beispiel beträgt im Jahr 1997 der Unterschied zwischen dem unteren Wert und dem Mittelwert der Sättigungskurve ca. 39%.





**Abb. C.9:** Entwicklung des Nutzungsgrades von Warmwasseranlagen betrieben mit Strom

Die Umwandlungsverluste von elektrischem Strom in thermische Energie sind sehr gering. Bei der Betrachtung des Gerätenutzungsgrades von Warmwasseranlagen, die mit Strom betrieben werden (Abb. C.9), ist deutlich zu erkennen, dass der Nutzungsgrad mehr als 90% beträgt. Zur Entwicklung der Sättigungskurve wurden die Daten der Studie nach Hauser und Hausladen [161] berücksichtigt. Nach dieser Studie lag der Nutzungsgrad im Jahr 1993 zwischen 90% und 99%. Auch wurden die Daten der Studien von IWU [165], Joos [1563] und Loga et al. [164] betrachtet. Die Werte der Studien von GRE [159] und Tzcheutscherler et al. [245] wurden hingegen nicht berücksichtigt. Die Sättigungskurve in Abb. C.9 zeigt, dass keine starken Veränderungen des Nutzungsgrades von Warmwasseranlagen betrieben mit Strom vorhanden waren (von 91% im Jahr 1990 bis 94% im Jahr 2010). Die Streuung der Werte aller berücksichtigten Studien in Bezug auf die Sättigungskurve beläuft sich auf nicht mehr als 8% (im Jahr 1993), das heißt, dass eine deutliche Ähnlichkeit der Werte vorhanden ist.

Zum Nutzungsgrad von Anlagen zur Warmwasserbereitung mit Fernwärme liegen nur zwei Studien vor. Nach IWU [165] lag der Nutzungsgrad der Fernwärme im Jahr 1997 zwischen 90% und 98%. Nach Öko- Institut und Prognos [154] belief sich der Nutzungsgrad im Jahr 2005 auf 78% und liefert damit einen niedrigeren Wert als die Studie vom IWU [156]. Daher war es nicht möglich, eine belastbare Aussage bezüglich der Entwicklung des

Nutzungsgrades treffen zu können. Deswegen wurde der Mittelwert aus den Werten der beiden Studien (IWU [165]; Öko-Institut und Prognos [154]) gebildet, der sich auf einen Wert von 86% beläuft.

Zur Erstellung einer Sättigungskurve, die die Entwicklung des Nutzungsgrades von Warmwasseranlagen betrieben mit Kohle widerspiegelt, sind nicht genügend Daten vorhanden. Außerdem weisen die vorhandenen Daten keine deutliche Entwicklung des Nutzungsgrads auf. Zum Beispiel beläuft sich der Nutzungsgrad in den ersten Jahrzehnten (1990-2000) nach den Studien von Hauser und Hausladen [161] und PROBAS [169] auf einen Wert höher als 70%. Im Gegensatz dazu weist die Studie vom Öko-Institut und Prognos [154] für das Jahr 2005 einen niedrigeren Nutzungsgrades von ca. 52% auf. Aufgrund der Nichtübereinstimmung bezüglich der Nutzungsgradwerte der verschiedenen Studien (Hauser und Hausladen [160, 161], PROBAS [169], Öko-Institut und Prognos [154] und dem Mangel an Daten zur Erstellung einer Trendlinie wurde der Mittelwert (61%) gebildet.

Zum Nutzungsgrad von Warmwasseranlagen betrieben mit sonstigen Quellen inkl. erneuerbaren Energien ist nur eine Studie (Öko-Institut und Prognos) [154] vorhanden, die einen Wert (57%) zum Nutzungsgrad angibt. Alle anderen Studien liefern nur Referenzdaten. Aus diesem Grund wurde der Nutzungsgrad für diese Warmwasseranlagen auf 57% festgelegt. In Tab. C.3 ist zu erkennen, dass der betrachtete Wert von 57% im Bereich der Werte der Studien von GRE [159] und Tzcheutscherler et al. [245] liegt. Dabei ist jedoch anzumerken, dass diese Studien allgemeine Werte zum Nutzungsgrad im Bereich Warmwasseranlagen liefern.

Bei der Entwicklung des Nutzungsgrades für Kochen mit Gas oder Strom wurde festgestellt, dass die Daten nicht ausreichen, um eine Sättigungskurve entwickeln zu können. In Tab. C.3 ist nur ein Wert zum Nutzungsgrad für Kochen mit Gas (65%) vorhanden und zwei für den Bereich Kochen mit Strom (beide 100%). Deswegen wird in dieser Arbeit angenommen, dass der Nutzungsgrad der Geräte zum Kochen mit Gas bei ca. 65% und zum Kochen mit Strom bei ca. 100% liegt.

Zur Beschreibung der Verbesserung des Nutzungsgrades von Geräten, die der Beleuchtung dienen, wurde die Studie vom FfE (b) [157] herangezogen. Diese Studie zeigt, dass für das Jahr 2000 der Nutzungsgrad einen Wert von ca. 7,9% aufwies. Gleichzeitig zeigen sämtliche anderen Studien, dass der Nutzungsgrad zwischen 5% und 7,3% lag [163, 245]. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit angenommen, dass die Berechnung des Mittelwerts die geeignetste Methode ist, um die Entwicklung der Nutzungsgrade im Bereich Beleuchtung betrieben mit elektrischem Strom darzustellen. In diesem Fall beträgt der Mittelwert

ca. 6%. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass der Nutzungsgrad am Ende des betrachteten Zeitraumes (2010) durch die zunehmende Verbreitung von Kompaktleuchtstofflampen im Wohnungssektor gestiegen ist [167]. Im Zusammenhang von LED-Lampen ist zukünftig eine weitere Verbesserung zu erwarten, die es in Prognosemodelle zu integrieren gilt. Bei einem Anteil von 2% am Gesamtendenergieverbrauch im Wohnungssektor (Abb. 2.10) ist der tatsächliche Einfluss auf den Endenergieverbrauch jedoch eher gering.

Tab. C.4 fasst die Entwicklung der Nutzungsgrade, aufgliedert nach Energienutzung (Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Beleuchtung, Elektrogeräte) und Energiequelle (Heizöl, Gas, Strom, Fernwärme, Kohle und Sonstige ink. Erneuerbare), zusammen.

**Tab. C.4:** Entwicklung der Jahresnutzungsgrade nach Nutzungsbereichen (%)

Jahr	Raumwärme						Warmwasser						Kochen		Beleuchtung
	Heizöl	Gas	Strom	Fernwärme	Kohle	Sonstige ink. Erneuerbare	Heizöl	Gas	Strom	Fernwärme	Kohle	Sonstige ink. Erneuerbare	Gas	Strom	Strom
1990	63,2	67,1	93,4	91,9	49,0	43,1	50,7	49,0	91,2	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
1991	65,8	69,7	94,3	92,2	51,5	46,1	51,3	52,0	91,3	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
1992	68,3	72,3	95,1	92,6	53,8	49,0	52,0	54,9	91,3	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
1993	70,8	74,5	95,8	93,0	56,1	51,9	52,8	57,6	91,4	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
1994	72,5	76,0	96,4	93,4	58,3	54,7	53,6	60,1	91,5	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
1995	73,8	77,3	96,9	93,8	60,4	57,4	54,4	62,4	91,6	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
1996	74,9	78,3	97,3	94,2	62,4	59,9	55,4	64,6	91,8	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
1997	75,8	79,1	97,6	94,5	64,3	62,4	56,3	66,6	91,9	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
1998	76,6	79,8	97,8	94,9	66,1	64,9	57,4	68,4	92,0	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
1999	77,3	80,6	98,0	95,3	67,8	67,2	58,5	70,1	92,2	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
2000	77,9	81,1	98,2	95,7	69,4	69,4	59,6	71,6	92,3	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
2001	78,4	81,6	98,4	96,1	71,0	71,5	60,9	72,9	92,5	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
2002	78,9	82,1	98,5	96,5	72,4	73,6	62,1	74,1	92,7	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
2003	79,5	82,6	98,7	96,8	73,8	75,5	63,5	75,1	92,9	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
2004	79,9	83,0	98,8	97,2	75,0	77,4	64,9	75,9	93,1	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
2005	80,3	83,4	98,9	97,6	76,2	79,2	66,3	76,5	93,3	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
2006	80,6	83,7	99,0	98,0	77,3	80,8	67,8	77,0	93,5	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
2007	81,0	84,1	99,1	98,4	78,3	82,4	69,4	77,4	93,7	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
2008	81,4	84,4	99,2	98,7	79,2	83,9	71,0	77,5	93,9	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
2009	81,7	84,7	99,3	99,1	80,0	85,4	72,7	77,5	94,2	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2
2010	81,9	84,9	99,3	99,5	80,7	86,0	74,4	77,6	94,4	86,0	61,0	57,0	65,0	100,0	6,2

### C.3 Unterteilung des Nutzenergieverbrauchs nach Energiequellen

**Tab. C.5:** Unterteilung des Nutzenergieverbrauchs nach Energiequellen

Jahr	Raumwärme						Warmwasser						Kochen		Beleuchtung
	Heizöl	Gas	Strom	Fernwärme	Kohle	Sonstige ink. Erneuerbare	Heizöl	Gas	Strom	Fernwärme	Kohle	Sonstige ink. Erneuerbare	Strom	Gas	Strom
1990	47,5	36,8	3,9	4,5	4,4	2,8	35	33	25	4,3	1	1,7	86,5	13,5	100
1991	46,7	37,2	3,9	4,7	4,2	3,3	35	33,5	25,1	4,4	0,2	1,8	86,4	13,7	100
1992	45,9	37,6	3,9	4,8	4	3,7	34	34,1	25,2	4,4	0,5	1,8	86,2	13,8	100
1993	45,1	37,9	3,9	5	3,8	4,2	34	34,2	25,4	4,4	0,1	1,9	86,0	14,0	100
1994	44,3	38,3	3,9	5,2	3,6	4,7	33	34,7	25,5	4,4	0,5	2	85,9	14,2	100
1995	43,6	38,7	3,9	5,3	3,4	5,1	31	35,8	25,6	4,5	1,2	2	85,7	14,3	100
1996	41,6	39,7	4,3	6,2	4,4	3,7	29,6	35,3	26,2	6	1	1,7	84,9	15,2	100
1997	42,4	38,5	3,8	5,8	3	6,5	29,6	35,3	26,2	6,0	1,0	1,7	85,4	14,8	100
1998	41,7	39,4	3,7	5,8	2,3	7,1	30,1	35,9	25,5	4,7	0,8	3,0	85,8	14,3	100
1999	40,2	40,2	3,7	5,8	2,4	7,6	29,6	36,6	26,0	4,7	1,1	2,0	85,8	14,3	100
2000	39,5	40,6	3,8	5,9	2,2	8	28,6	38,1	26,2	3,9	1,1	2,0	85,8	14,3	100
2001	38,5	41,1	3,9	5,6	2,1	8,7	25,5	40,1	26,7	4,1	1,3	2,2	87,2	12,9	100
2002	38,2	41,5	3,9	5,8	1,9	8,7	22,2	42,0	28,4	4,0	1,4	2,1	87,5	12,5	100
2003	37,7	41,5	4,1	6,7	1,5	8,5	23,3	40,5	28,3	4,2	1,6	2,1	82,5	17,5	100
2004	35,9	42,2	4,3	7,3	1,4	8,9	20,9	45,3	24,4	4,5	1,2	3,7	82,5	17,5	100
2005	37	41,5	4	6,8	1,6	9,1	20,0	44,7	27,0	4,9	0,6	2,8	83,4	16,7	100
2006	36,4	41,5	3,8	6,9	1,7	9,8	21,0	43,1	27,9	4,8	0,7	2,6	83,4	16,7	100
2007	31,4	44,3	3,6	8	1,9	10,8	18,8	42,4	28,3	5,7	2,0	2,8	83,4	16,7	100
2008	33,3	43,5	3,8	7,4	1,1	11	16,2	42,4	30,0	6,1	2,2	3,0	83,1	17,2	100
2009	32,5	43,8	3,7	7,6	0,9	11,5	16,7	43,7	27,1	7,3	2,1	3,2	82,8	17,3	100
2010	31,7	44,2	3,7	7,8	0,7	12	16,3	45	27,2	7,8	0,2	3,5	82,7	17,5	100

Daten für 1996–2007: [147], ergänzt durch Projektionen der Tendenzen für 1990–1995 und 2008–2010.

## C.4 Entwicklung der Anzahl der Gebäude und Wohnungen in Deutschland

**Tab. C.6:** Entwicklung der Anzahl der Gebäude und Wohnungen in Deutschland

<b>Jahr</b>	<b>Anzahl der Gebäude</b>	<b>Anzahl der Wohnungen</b>	<b>Anzahl bewohnte Wohnungen (Tsd.)</b>
1990	12.423.347	33.856.321	31.126
1991	12.553.361	34.173.581	31.418
1992	12.690.750	34.547.348	31.761
1993	12.844.433	34.988.753	32.167
1994	15.522.698	35.370.790	32.518
1995	15.732.422	35.954.317	33.055
1996	15.924.303	36.492.323	33.549
1997	16.137.329	37.050.369	34.062
1998	16.352.889	37.529.144	34.503
1999	16.583.053	37.984.298	34.921
2000	16.802.259	38.383.645	35.288
2001	16.977.662	38.681.801	35.562
2002	17.139.079	38.924.836	35.786
2003	17.293.678	39.141.543	35.985
2004	17.458.670	39.362.266	36.188
2005	17.599.942	39.551.203	36.362
2006	17.742.413	39.753.733	36.548
2007	17.859.112	39.918.192	36.699
2008	17.949.803	40.057.282	36.827
2009	18.029.257	40.183.563	36.943
2010	18.234.580	40.318.513	37.067

Die Anzahl der Gebäude und Wohnungen in Deutschland wurde aus der Studie „Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden Lange Reihen ab 1969–2013“ [23] entnommen. Die Anzahl der bewohnten Wohnungen (unter Berücksichtigung eines Leerstandes von 8%), wurde aus dem Excel-Tool für das Projekt „Energieeffizienz in Zahlen“ des UBA [152] entnommen.

## C.5 Deutsche Gebäudetypologie

**Tab. C.7:** Deutsche Gebäudetypologie

			Baualterklassen									
			A bis 1861	B 1861- 1919	C 1919- 1949	D 1949- 1958	E 1958- 1969	F 1969- 1979	G 1979- 1984	H 1984- 1994	I 1995- 2001	J 2002- 2009
Gebäudetypen	EFH	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	51	155	173	127	221	213	111	148	152	114
		Anzahl Wohnungen in Tsd.	510	1.370	1.720	1.240	2.150	1.930	940	1.230	1.250	880
		Anzahl Wohngebäude in Tsd.	370	1.040	1.280	920	1.580	1.470	750	1.040	1.080	790
	RH	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>		43	91	57	76	78	47	66	62	37
		Anzahl Wohnungen in Tsd.		470	960	570	770	760	400	590	540	310
		Anzahl Wohngebäude in Tsd.		350	800	480	670	650	380	540	500	300
	MFH	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	13	112	134	131	197	109	69	76	119	41
		Anzahl Wohnungen in Tsd.	170	1.490	1.920	2.000	2.800	1.500	990	1.060	1.600	510
		Anzahl Wohngebäude in Tsd.	50	380	460	390	550	320	160	210	200	70
	GMH	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>		10	17	31	84	127	39	84		
		Anzahl Wohnungen in Tsd.		180	260	570	1.450	2.480	570	1.290		
		Anzahl Wohngebäude in Tsd.		10	10	30	60	80	30	40		
	Gesamte Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>		64	384	799	1.145	1.723	2.250	2.516	2.890	3.223	3.415
	Gesamte Anzahl Wohnungen in Tsd.		680	4.190	9.050	13.430	20.600	27.270	30.170	34.340	37.730	39.430
	Gesamte Wohngebäude in Tsd.		420	2.200	4.750	6.570	9.430	11.950	13.270	15.100	16.880	18.040

Die hier gezeigte Tabelle wurde auf der Basis von Daten des IWU (Institut für Wohnen und Umwelt) entwickelt. Das IWU hat drei Fassungen (2007, 2011, 2013) zur deutschen Gebäudetypologie veröffentlicht, die Daten zur Häufigkeit des Vorkommens von Gebäuden, sowie zu Wohnungen und Wohnflächen nach Gebäudetypen und Baualterklassen, beinhalten [17, 41, 290]. Diese drei Fassungen enthalten im Wesentlichen eine Matrix der verschiedenen Gebäudetypen (EFH = Einfamilienhaus, RH = Reihenhaushaus, MFH = Mehrfamilienhaus, GMH = großes Mehrfamilienhaus und HH = Hochhaus), unterteilt in zehn Baualterklassen. In den Jahren 2007 und 2011 werden fünf Gebäudetypen (Einfamilienhaus, Reihenhaushaus, Mehrfamilienhaus, großes Mehrfamilienhaus und Hochhaus), unterteilt nach alten und neuen Bundesländern, aufgelistet. Dagegen wurden im Jahr 2013 nur noch vier Gebäudetypen (Einfamilienhaus, Reihenhaushaus, Mehrfamilienhaus, großes Mehrfamilienhaus), ohne Unterteilung in alte und neue Bundesländer, genannt. Die Hochhäuser wurden in den Gebäudetyp „großes Mehrfamilienhaus“ integriert [290].

## C.6 Entwicklung des Verhältnisses der Wohnfläche pro Person in Deutschland

**Tab. C.8:** Entwicklung des Verhältnisses der Wohnfläche pro Person in Deutschland

Jahr	Bevölkerung <sup>1</sup> (Tsd)	Wohnfläche <sup>2</sup> (1000 m <sup>2</sup> )	Wohnfläche pro Personen (m <sup>2</sup> /per)
1990	79.753	2.774.304	34,79
1991	80.274	2.804.905	34,94
1992	80.974	2.839.665	35,07
1993	81.338	2.880.378	35,41
1994	81.538	2.952.927	36,22
1995	81.817	3.005.457	36,73
1996	82.012	3.054.302	37,24
1997	82.057	3.106.250	37,85
1998	82.037	3.153.846	38,44
1999	82.163	3.201.599	38,97
2000	82.259	3.245.487	39,45
2001	82.440	3.280.295	39,79
2002	82.537	3.310.205	40,11
2003	82.531	3.339.229	40,46
2004	82.501	3.368.920	40,83
2005	82.438	3.394.782	41,18
2006	82.315	3.421.384	41,56
2007	82.217	3.443.790	41,89
2008	82.002	3.462.334	42,22
2009	81.802	3.479.042	42,53
2010	81.752	3.496.358	42,77

<sup>1</sup> Bevölkerungsentwicklung nach DESTATIS 2012 [244]

<sup>2</sup> Entwicklung der Wohnfläche in Deutschland. Abgeleitet aus [23]



## C.7 Spezifischer Endenergieverbrauch pro Wohnung für statistische-Modelle

**Tab. C.9:** Spezifischer Endenergieverbrauch pro Wohnung

Jahr	Endenergieverbrauch nach Nutzungsbereich (MWh/WE)				
	Raumwärme	Warmwasser	Kochen	Elektrogeräte	Beleuchtung
1990	15,9	1,8	0,5	1,0	0,3
1991	16,7	1,9	0,6	1,1	0,3
1992	16,1	1,9	0,6	1,1	0,3
1993	17,2	2,1	0,6	1,2	0,3
1994	16,6	2,1	0,6	1,3	0,3
1995	17,1	2,3	0,7	1,4	0,3
1996	18,6	2,5	0,8	1,4	0,4
1997	18,1	2,6	0,8	1,6	0,3
1998	17,7	2,5	0,8	1,5	0,3
1999	16,4	2,4	0,8	1,5	0,4
2000	16,1	2,4	0,8	1,5	0,3
2001	18,0	2,4	0,9	1,6	0,3
2002	17,0	2,4	0,9	1,6	0,3
2003	17,2	2,5	0,9	1,7	0,3
2004	16,3	2,5	0,9	1,6	0,3
2005	15,9	2,4	1,0	1,6	0,3
2006	16,0	2,5	1,0	1,7	0,3
2007	13,3	2,2	0,9	1,7	0,3
2008	15,0	2,8	1,2	1,7	0,4
2009	14,4	2,7	1,2	1,6	0,4
2010	16,2	2,7	1,1	1,6	0,4

Die Ergebnisse dieser Tabelle wurden auf Basis der Division des jährlichen Endenergieverbrauchs nach Nutzungsbereichen (Anhang C, Abschnitt C.1) durch die Anzahl der Wohnungen (Anhang C, Abschnitt C.4) erhalten.

## C.8 Energieverbrauchskennwerte nach Gebäudetyp

**Tab. C.10:** Endenergieverbrauchskennwerte für Raumwärme und Warmwasser nach Gebäudetyp für das BSM-Modell Datenquelle: [27]

Gebäudetyp		vor 1919 in KWh/m <sup>2</sup>	1919 bis 1948 in KWh/m <sup>2</sup>	1949 bis 1957 in KWh/m <sup>2</sup>	1958 bis 1968 in KWh/m <sup>2</sup>	1969 bis 1978 in KWh/m <sup>2</sup>	1979 bis 1983 in KWh/m <sup>2</sup>	1984 bis 1990 in KWh/m <sup>2</sup>	1991 bis 1995 in KWh/m <sup>2</sup>	1996 bis 2000 in KWh/m <sup>2</sup>	2001 bis 2010 in KWh/m <sup>2</sup>
alte Bundesländer	EFH/ZFH	290	303	354	241	217	165	159	142	126	100
	MFH (3 bis 6 WE)	239	271	278	262	219	136	151	110	106	88
	GMFH (7 bis 12 WE)	237	250	238	231	186	115	97	93	90	74
	HH (> 12 WE)	172	182	173	168	161	100	84	81	78	64
neue Bundesländer	EFH/ZFH	370	341	393	393	239	227	198	177	159	127
	MFH (3 bis 6 WE)	238	210	224	223	223	212	183	178	173	144
	GMFH (7 bis 12 WE)	242	213	157	156	156	142	123	119	116	97
	HH (> 12 WE)	236	208	153	152	152	192	166	161	157	131

**Tab. C.11:** Nutzenergieverbrauchskennwerte für Raumwärme und Warmwasser nach Gebäudetyp für das FfE-Gebäudemodell. Datenquelle: abgeleitet aus [16]

Gebäudetyp	Spezifischer Raumwärmebedarf in kWh/m <sup>2</sup>										Spezifischer Warmwasser- bedarf in kWh/m <sup>2</sup>
	vor 1900	1900 bis 1945	1946 bis 1960	1961 bis 1970	1971 bis 1980	1981 bis 1985	1986 bis 1995	1996 bis 2000	2001 bis 2005	2006 bis 2010	
EFH	178	186	177	172	185	172	137	110	88	70	18
RH	160	168	171	172	167	170	136	108	87	69	20
MFH (3 bis 12 WE)	142	137	141	137	136	145	123	105	89	76	26
MFH (> 12 WE)	146	141	145	141	136	130	111	94	80	68	26

**Tab. C.12:** Nutzenergieverbrauchskennwerte für Raumwärme und Warmwasser nach Gebäudetyp für das REM-Modell. Datenquelle: abgeleitet aus [41]

Gebäudetyp	vor 1861 in kWh/m <sup>2</sup>	1861 bis 1919 in kWh/m <sup>2</sup>	1919 bis 1949 in kWh/m <sup>2</sup>	1949 bis 1958 in kWh/m <sup>2</sup>	1958 bis 1969 in kWh/m <sup>2</sup>	1969 bis 1979 in kWh/m <sup>2</sup>	1979 bis 1984 in kWh/m <sup>2</sup>	1984 bis 1994 in kWh/m <sup>2</sup>	1995 bis 2001 in kWh/m <sup>2</sup>	2002 bis 2009 in kWh/m <sup>2</sup>
EFH	481	462	386	467	455	352	256	288	185	135
RH		358	294	349	221	266	267	204	135	123
MFH	468	305	371	335	260	270	235	243	147	102
GMH		252	298	293	264	234	184	211		

## C.9 Bevölkerungsentwicklung, Anzahl der Wohnungen, Personen pro Wohnung und Gradtagzahl nach Jahr

**Tab. C.13:** Bevölkerungsentwicklung, Anzahl der Wohnungen, Personen pro Wohnung und Gradtagzahl nach Jahr

Jahr	Bevölkerung	Anzahl der Wohnungen	Personen pro Wohnung	Gradtagzahl <sup>6</sup>
	[Tsd.]	[Tsd.]		
1990	79.753 <sup>1</sup>	31.126 <sup>3</sup>	2,56	3436
1991	80.274 <sup>1</sup>	31.418 <sup>3</sup>	2,56	3872
1992	80.974 <sup>1</sup>	31.761 <sup>3</sup>	2,55	3549
1993	81.338 <sup>1</sup>	32.167 <sup>3</sup>	2,53	3786
1994	81.538 <sup>1</sup>	32.518 <sup>3</sup>	2,51	3465
1995	81.817 <sup>1</sup>	33.055 <sup>3</sup>	2,48	3741
1996	82.012 <sup>1</sup>	33.549 <sup>3</sup>	2,44	4347
1997	82.057 <sup>1</sup>	34.062 <sup>3</sup>	2,41	3737
1998	82.037 <sup>1</sup>	34.503 <sup>3</sup>	2,38	3611
1999	82.163 <sup>1</sup>	34.921 <sup>3</sup>	2,35	3433
2000	82.435 <sup>2</sup>	35.370 <sup>4</sup>	2,33 <sup>5</sup>	3287
2001	82.708 <sup>2</sup>	35.825 <sup>4</sup>	2,31 <sup>5</sup>	3743
2002	82.982 <sup>2</sup>	36.286 <sup>4</sup>	2,29 <sup>5</sup>	3743
2003	83.257 <sup>2</sup>	36.753 <sup>4</sup>	2,27 <sup>5</sup>	3743
2004	83.533 <sup>2</sup>	37.226 <sup>4</sup>	2,24 <sup>5</sup>	3743
2005	83.810 <sup>2</sup>	37.705 <sup>4</sup>	2,22 <sup>5</sup>	3743
2006	84.088 <sup>2</sup>	38.190 <sup>4</sup>	2,20 <sup>5</sup>	3743
2007	84.366 <sup>2</sup>	38.681 <sup>4</sup>	2,18 <sup>5</sup>	3743
2008	84.646 <sup>2</sup>	39.179 <sup>4</sup>	2,16 <sup>5</sup>	3743
2009	84.926 <sup>2</sup>	39.683 <sup>4</sup>	2,14 <sup>5</sup>	3743
2010	85.208 <sup>2</sup>	40.193 <sup>4</sup>	2,12 <sup>5</sup>	3743

<sup>1</sup> Bevölkerungsentwicklung nach DESTATIS 2012 [244]

<sup>2</sup> Projektion durch Verwendung einer Wachstumsrate der Populationsgröße

<sup>3</sup> nur tatsächlich bewohnte Wohnungen berücksichtigt (s. Anhang C-4)

<sup>4</sup> Projektion durch Verwendung der Gleichung 3-3 von MAED-2

<sup>5</sup> Projektion (Wachstumsrat - 0,94%)

<sup>6</sup> Entwicklung der Gradtagzahlen nach UBA 2011 [152] (ab dem Jahr 2001 als langjähriges Mittel der Gradtagzahlen (1970-2008))

## C.10 Gebäudedaten für Simulationen mit bauphysikalischen Modellen

**Tab. C.14:** Gebäudedaten für Simulationen mit bauphysikalischen Modellen (Wohnfläche, Bauteilflächen, U-Werte, spezifischer Wärmeverlust). Datenquelle: Studie „Deutsche Gebäudetypologie“ des IWU [17, 41, 290]

		Beheizte Wohnfläche	Bauteilflächen (m <sup>2</sup> )					U-Werte (W/m <sup>2</sup> K)					spezifischer Transmissionswärmeverlust (W/m <sup>2</sup> K)		Endenergiebedarf (Raumwärme + Warmwasser) (kWh/m <sup>2</sup> a)
			Dach	Wand	Fußboden	Fenster	Hautür	Dach	Wand	Fußboden	Fenster	Hautür	bezogen auf Hüllfläche	bezogen auf Wohnfläche	
EFH	EFH-A	199	134	169	85	28	2	2,6	2	2,9	3,5	3	2,24	4,73	481,2
	EFH-B	128	83	194	77	22	2	1,3	1,7	1,2	3,5	3	2,54	4,53	462,2
	EFH-C	275	214	235	144	52	2	1,4	1,7	1	3,5	3	1,5	3,54	386,2
	EFH-D	101	125	117	79	18	2	1,4	1,4	1,1	3,5	3	1,35	4,61	467,2
	EFH-E	110	180	183	145	45	2	0,8	1,2	1,6	3,5	3	1,7	4,5	455,2
	EFH-F	157	183	177	152	34	2	0,5	1	1	3,5	3	0,9	3,13	352,2
	EFH-G	196	100	159	83	27	2	0,5	0,8	0,8	4,3	3	0,98	1,86	256,2
	EFH-H	136	123	211	75	29	2	0,4	0,5	0,6	3,5	3	0,72	2,34	288,2
	EFH-I	110	115	126	84	32	2	0,35	0,3	0,45	1,9	2	0,55	1,78	185,2
	EFH-J	133	85	188	79	28	2	0,25	0,3	0,3	1,4	2	0,39	1,14	135,2
RH	RH-B	87	60	74	60	18	2	1,3	1,7	1,2	2,7	3	1,28	3,16	358,2
	RH-C	102	50	64	50	21	2	1,4	1,7	1	3,5	3	1,31	2,4	294,2
	RH-D	136	81	134	81	46	2	1,4	1,2	2,1	3,5	3	1,27	3,22	349,2
	RH-E	106	46	40	46	13	2	0,8	1,2	1,6	3,5	3	1,5	1,46	221,2
	RH-F	96	60	53	60	23	2	0,5	1	1	3,5	3	0,99	2,6	266,2
	RH-G	98	97	54	73	20	2	0,5	0,8	0,8	3,5	3	0,82	2,6	267,2
	RH-H	116	64	50	56	18	2	0,4	0,6	0,6	3,5	3	0,77	1,28	204,2
	RH-I	135	77	45	51	22	2	0,35	0,6	0,45	1,6	2	0,62	0,98	135,2
	RH-J	138	91	140	70	36	2	0,2	0,3	0,3	1,3	2	0,41	1	123,2
	MFH-A	615	284	749	173	107	2	0,6	2	1,2	3,5	3	2,1	4,48	468,2
MFH	MFH-B	284	102	146	102	54	2	1,3	2,2	1,2	2,7	3	1,7	2,44	304,6
	MFH-C	350	188	323	158	71	2	1,4	1,7	1	3,5	3	1,54	3,29	370,6
	MFH-D	574	355	462	355	98	2	1,4	1,2	2,2	3,5	3	1,26	2,79	334,6
	MFH-E	2844	971	2039	971	507	2	0,8	1,2	1,6	3,5	3	1,21	1,91	259,6
	MFH-F	426	216	336	216	81	2	0,5	1	1	3,5	4	1,2	2,3	269,6
	MFH-G	594	248	447	248	99	2	0,5	0,8	0,8	3,5	4	0,92	1,61	234,6
	MFH-H	707	249	774	249	161	2	0,4	0,6	0,6	3,5	4	0,87	1,77	242,6
	MFH-I	759	283	695	283	162	2	0,35	0,4	0,45	1,9	2	0,62	1,16	146,9
	MFH-J	1991	580	1698	619	308	2	0,2	0,25	0,35	1,4	3	0,39	0,62	101,9
	GMH-B	754	231	305	163	136	2	1,3	1,7	1,2	3,5	3	1,63	1,81	251,6
GMH	GMH-C	1349	384	1244	395	278	2	1,4	1,4	1	3,5	3	1,39	2,38	297,6
	GMH-D	1457	353	1376	353	294	2	0,8	1,2	2,1	3,5	3	1,42	2,33	292,6
	GMH-E	3534	479	3247	459	687	2	0,8	1,2	1,6	3,5	3	1,42	1,96	263,6
	GMH-F	3020	540	2130	540	545	2	0,5	1,1	1	3,5	4	1,29	1,6	233,6
	GMH-G	2825	598	1673	598	387	2	0,5	1,9	0,8	2,7	4	0,88	1,1	183,6
	GMH-H	4796	598	1673	598	387	2	0,5	1,6	0,6	2,7	4	1,29	1,33	210,6

## C.11 Klimadaten für Deutschland

**Tab. C.15:** Klimadaten für Deutschland

	Mittlere monatliche Strahlungsintensität ( $\text{W/m}^2$ ) auf eine $90^\circ$ geneigte Fläche				Außentemperatur ( $^\circ\text{C}$ )
	Norden	Osten	Süden	Westen	
Januar	10	25	59	17	1
Februar	18	29	47	24	1,9
März	31	68	98	60	4,7
April	58	134	147	114	9,2
Mai	75	137	132	127	14,1
Juni	83	150	124	136	16,7
Juli	81	138	113	117	19
August	57	115	127	105	18,6
September	41	83	123	79	14,3
Oktober	25	55	106	47	9,5
November	13	20	39	19	4,1
Dezember	7	12	29	11	0,9
Durchschnittliche Jahreswerte	41,6	80,5	95,3	71,3	9,5

Diese Tabelle basiert auf den Referenzwerten der monatlichen Mittelwerte der Strahlungsintensitäten für das Referenzklima Deutschland - Potsdam nach DIN V 18599-10:2011-12, Abschnitt 7.1 [224]

## C.12 Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren

**Tab. C.16:** Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im deutschen Wohnungssektor. Datenquelle: [64]

Jahr	Deutschland (Mio. Ton)	Deutschen Wohnungssektor (Mio. Ton)
1990	1.008	129
1991	971	132
1992	924	124
1993	915	134
1994	899	129
1995	898	129
1996	919	142
1997	890	138
1998	882	132
1999	855	120
2000	859	118
2001	869	131
2002	899	121
2003	901	122
2004	889	113
2005	872	111
2006	878	113
2007	855	88
2008	853	107
2009	792	98
2010	835	106

**Tab. C.17:** Primärenergiefaktoren und CO<sub>2</sub>-Emissionfaktoren nach Energieträger. Datenquelle: [164]

Energieträger	Primärenergiefaktor	CO <sub>2</sub> - Emissionsfaktor in gCO <sub>2</sub> /kWh
Heizöl	1,1	310
Erdgas	1,1	250
Flüssiggas	1,1	270
Steinkohle	1,1	440
Braunkohle	1,2	450

### C.13 Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Eingangsparameter

**Tab. C.18:** Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Eingangsparameter

Eingangsparameter	Kategorie <sup>1</sup>	Wahrscheinlichkeitsfunktion
Wachstumsrate Anzahl der Wohnungen (%)	D	Diskrete gleichmäßige Verteilung (DGV) [0,7-1,6]
Innentemperatur (°C)	S	DGV [18-21]
Außentemperatur Januar (°C)	S	Weibull [1,2; 3,9; -0,02]
Außentemperatur Februar (°C)	S	Beta [-1,9 < t < 3,8; 3; 2]
Außentemperatur März (°C)	S	Beta [0,8 < t < 8,1; 3; 2]
Außentemperatur April (°C)	S	Normal [9,2; 1,5]
Außentemperatur Mai (°C)	S	Normal [14,1; 1,6]
Außentemperatur Juni (°C)	S	Beta [12,5 < t < 17,5; 2; 3]
Außentemperatur Juli (°C)	S	Normal [19; 1,9]
Außentemperatur August (°C)	S	Normal [18,7; 1,9]
Außentemperatur September (°C)	S	Beta [10,6 < t < 19,2; 2; 3]
Außentemperatur Oktober (°C)	S	Normal [9,5; 1,4]
Außentemperatur November (°C)	S	Beta [2,4 < t < 7,4; 3; 2]
Außentemperatur Dezember (°C)	S	Beta [-0,7 < t < 1,6; 3; 2]
Jahresdurchschnitt Sonnenstrahlung (W/m <sup>2</sup> )	S	Normal [72; 46,2]
Gradtagzahl (Kd)	S	DGV [3433-4347]
Luftwechselrate (1/h)	S	DGV [0,5-0,9]
Nutzungsgrad Heizanlage (Betrieb mit Gas) (%)	D	DGV [0,7 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Heizanlage (Betrieb mit Öl) (%)	D	DGV [0,6 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Heizanlage (Betrieb mit Strom) (%)	D	DGV [0,9 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Heizanlage (Betrieb mit Fernwärme)	D	DGV [0,5 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Heizanlage (Betrieb mit Kohle) (%)	D	DGV [0,5 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Heizanlage (Betrieb mit Sonstige	D	DGV [0,4 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Warmwasser (Betrieb mit Gas) (%)	D	DGV [0,5 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Warmwasser (Betrieb mit Öl) (%)	D	DGV [0,5 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Warmwasser (Betrieb mit Strom) (%)	D	DGV [0,9 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Warmwasser (Betrieb mit Fernwärme) (%)	D	DGV [0,9 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Warmwasser (Betrieb mit Kohle) (%)	D	DGV [0,6 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Warmwasser (Betrieb mit Sonstige) (%)	D	DGV [0,6 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Kochen (Betrieb mit Gas) (%)	D	DGV [0,7 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Kochen (Betrieb mit Strom) (%)	D	DGV [0,9 → 1] <sup>2</sup>
Nutzungsgrad Beleuchtung (Betrieb mit Strom) (%)	D	DGV [0,3 → 1] <sup>2</sup>

<sup>1</sup>D: dynamische Eingangsparameter, S: statische Eingangsparameter

<sup>2</sup> → Tendenz der Eingangsparameter

Eingangsparameter	Kategorie <sup>1</sup>	Wahrscheinlichkeitsfunktion
Wachstumsrate der Bevölkerung (%)	D	DGV [0-0,6]
Personen pro Wohnung	D	DGV [2,6 → 2,1]
Wachstumsrate Anzahl der Gebäude (%)	D	DGV [0,9-1,4]
Sanierungsrate der Gebäude (%)	D	DGV [0,12-0,2]
Spezifischer Endenergieverbrauch für Raumwärme (MWh/Wohneinheiten)	D	DGV [16 → 18]
Spezifischer Endenergieverbrauch für Warmwasser (MWh/Wohneinheiten)	D	DGV [3 → 2]
Spezifischer Endenergieverbrauch für Kochen (MWh/WE)	D	DGV [0,76 → 0,82]
Spezifischer Endenergieverbrauch für Beleuchtung (MWh/WE)	D	DGV [0,37 → 0,31]
Spezifischer Endenergieverbrauch für Elektrogeräte (MWh/WE)	D	DGV [1,46 → 1,50]
spezifischer Wärmeverlust eines Einfamilienhauses (W/K)	S	Normal [42,6; 3,5]
Wohnfläche eines Einfamilienhauses (m²)	S	Normal [105; 8,2]
spezifischer Wärmeverlust eines Mehrfamilienhauses (W/K)	S	Normal [34,5; 4,2]
Wohnfläche Wohnungen in einem Mehrfamilienhauses (m²)	S	Normal [60; 7,5]
spezifischer Endenergieverbrauch für Kühlung (kWh/m²a)	S	Normal [1109; 90]
spezifischer Endenergieverbrauch für Kühlung (kWh/m²a)	S	Normal [1109; 90]
Anteil der Wohnungen mit Klimaanlage (%)	D	DGV [0,9 → 1,2]
Wohnfläche EFH (Mio. m²)	S	DGV [1.463 → 1.465]
Wohnfläche RH (Mio. m²)	S	DGV [632 → 645]
Wohnfläche MFH (Mio. m²)	S	DGV [1.167 → 1190]
Wohnfläche GMFH (Mio. m²)	S	DGV [288 → 294]
Spezifischer Raumwärmebedarf EFH (kWh/m²a)	S	Normal [148; 15]
Spezifischer Raumwärmebedarf RH (kWh/m²a)	S	Normal [141; 15]
Spezifischer Raumwärmebedarf MFH (kWh/m²a)	S	Normal [123; 15]
Spezifischer Raumwärmebedarf GMH (kWh/m²a)	S	Normal [119; 15]
Spezifischer Warmwasserbedarf EFH (kWh/m²a)	S	Normal [18; 1]
Spezifischer Warmwasserbedarf RH (kWh/m²a)	S	Normal [20; 1]
Spezifischer Warmwasserbedarf MFH (kWh/m²a)	S	Normal [26; 1]
Spezifischer Warmwasserbedarf GMH (kWh/m²a)	S	Normal [26; 1]
Gesamtnutzungsgrad für Raumwärme	D	DGV [0,8 → 1]
Gesamtnutzungsgrad für Warmwasser	D	DGV [0,7 → 1]

<sup>1</sup>D: dynamische Eingangsparameter, S: statische Eingangsparameter

<sup>2</sup> → Tendenz der Eingangsparameter



Input Parameter	Kategorie <sup>1</sup>	Wahrscheinlichkeitsfunktion
Anzahl Wohnungen EFH (Tsd.)	D	DGV [9.800→ 11.800]
Anzahl Wohnungen RH (Tsd.)	D	DGV [4.500→ 5.600]
Anzahl Wohnungen MFH (Tsd.)	D	DGV [14.400→ 16.300]
Anzahl Wohnungen GMH (Tsd.)	D	DGV [4.100→ 4.700]
Mittlere Wohnfläche je Haus-Archetyp EFH (m <sup>2</sup> )	D	Normal [111; 8,5]
Mittlere Wohnfläche je Haus-Archetyp RH (m <sup>2</sup> )	D	Normal [83; 7,8]
Mittlere Wohnfläche je Haus-Archetyp MFH (m <sup>2</sup> )	D	Normal [72; 7,5]
Mittlere Wohnfläche je Haus-Archetyp GMH (m <sup>2</sup> )	D	Normal [61; 5,3]
Wohnfläche pro Einwohner (m <sup>2</sup> /N)	D	DGV [32→ 40]
Bevölkerungsentwicklung (Tsd)	D	DGV [79.700→ 85.200]
U-Wert Außenwand (W/ m <sup>2</sup> K)	D	Beta [2,0< U <0,6; 2; 3]
Fläche Außenwand (m <sup>2</sup> )	S	Normal [628; 150]
Geschosshöhe (m)	S	Beta [2,0< Gh <3,5; 3; 2]
Fläche Boden (m <sup>2</sup> )	S	Normal [218; 50]
U-Wert Boden (W/ m <sup>2</sup> K)	D	Normal [1,2; 0,3]
Transmissionsfaktor in Abhängigkeit vom Glastype (-)	S	Normal [0,8; 0,01]
Strahlungintensität in (W/m <sup>2</sup> )	S	Normal [72; 23]
Schattierungsfaktor (-)	S	Normal [0,7; 0,01]
Anteil der Fensteröffnungen, aus Glas bestehend (%)	S	DGV [0,7-0,8]
U-Wert Fenster (W/ m <sup>2</sup> K)	D	DGV [4→ 1]
Nutzung von energiesparenden Leuchtmitteln (%)	D	DGV [0→ 50]
Fläche Dach (m <sup>2</sup> )	S	Normal [283; 57]
U-Wert Dach (W/ m <sup>2</sup> K)	D	Normal [1; 0,3]
Gesamte Fläche der Fensteröffnung ( m <sup>2</sup> )	S	Gamma [22; 16; 3]
Volumen Warmwasserspeicher (l)	S	Normal [190; 50]
Dämmung des Speichers (mm)	S	DGV [0→ 100]
U-Wert Tür (W/ m <sup>2</sup> K)	D	Minimum-Extremwert [3; 0,5]

<sup>1</sup> D: dynamische Eingangsparameter , S: statische Eingangsparameter

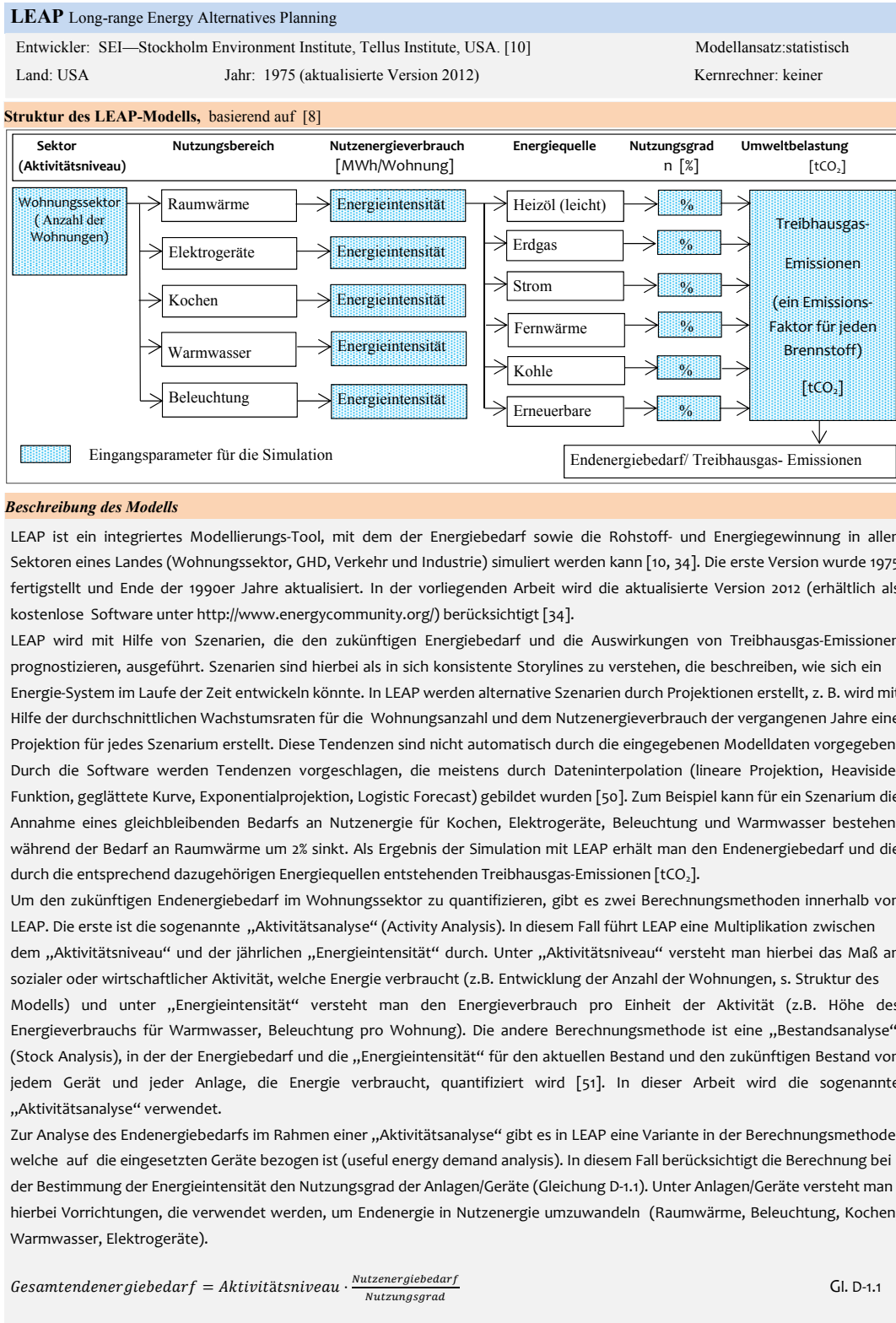
<sup>2</sup> → Tendenz der Eingangsparameter

### C.14 Gebäudeanzahl in den korrespondierenden Zeiträumen der Baualtersklasse nach Corradini et al. [16] (Gl. D-2.2)

**Tab. C.19:** Gebäudeanzahl in den korrespondierenden Zeiträumen der Baualtersklasse nach Corradini et al. [16] (Gl. D-2.2)

		Baualtersklasse									
		Vor 1900	1900 -1945	1946 -1960	1961 -1970	1971 -1980	1981 -1985	1986 -1995	1996 -2000	2001 -2005	2006 -2009
EFH	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	136	180	170	202	254	98	169	113	82	60
	Anzahl Gebäude in Tsd.	1.212	1.650	1.550	1.789	2.076	780	1.318	860	601	429
RH	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	61	94	74	70	89	42	81	57	37	26
	Anzahl Gebäude in Tsd.	297	480	382	341	383	177	344	241	150	102
MFH	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	125	170	178	201	178	62	124	74	34	20
	Anzahl Gebäude in Tsd.	335	488	559	595	485	168	339	199	86	46
GMH	Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	25	19	26	47	87	19	32	18	9	5
	Anzahl Gebäude in Tsd.	40	32	52	90	152	36	62	32	15	8

## D Ausführliche Beschreibung der bestehenden Modelle



### Berechnungsmethoden

#### Unterteilung des Wohnungsbestandes

In LEAP wird die gesamte Anzahl der Wohnungen ( $AW_{tot}$ ) betrachtet. Hierbei wird für die Projektion eine passende Tendenz der Anzahl der Wohnungen im Referenzzeitraum (1990-2000) verwendet, um die zukünftige Anzahl der Wohnungen im Prognosezeitraum zu bestimmen. Die Funktion *Wachstumsrate* (Growth rate,  $GR$ ) wurde verwendet, da diese Funktion mit einer Wachstumsrate von 1,3% im Referenzzeitraum den kleinsten Abweichungsfehler aufweist (<3%).

$$AW_{tot}(t) = AW_{t_R} \cdot \left[1 + \left(\frac{GR}{100}\right)\right]^{(t-t_R)} \quad \text{Gl. D-1.2}$$

Mit  $AW_{t_R}$ : gesamte Anzahl der Wohnungen im Referenzjahr  $t_R$

#### Anpassungen

Keine

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme ( $EEB_{rw}$ )

Der gesamte Endenergiebedarf für Raumwärme wird durch die Summe der Multiplikation der Anzahl der Wohnungen mit dem Quotienten zwischen dem Nutzenergieverbrauch  $NEVK_{rw,q}$  und dem Nutzungsgrad  $n_q$  unterteilt nach Energiequelle ( $q$ ) ermittelt.

$$EEB_{rw}(t) = \sum_q AW_q(t) \cdot \frac{NEVK_{rw,q}}{n_q} \quad \text{Gl. D-1.3}$$

#### Anpassungen

Um den Auswirkungen der EnEV rechnung zu tragen, wurde eine negative jährliche Wachstumsrate des Raumwärmebedarfs ab dem Jahr 2001 berücksichtigt.

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Warmwasser ( $EEB_{ww}$ )

Im Bereich Warmwasser wurde die Funktion *Interpolation* (Gleichung D-1.2) verwendet. Hierbei wurde ein Zielwert ( $zw$ ) für das Jahr 2010 verwendet, welcher gleichzeitig die repräsentativste Kurve für den Endenergiebedarf für Warmwasser im Referenzzeitraum bestimmte. Außerdem wurde der Energieverbrauch für Warmwasser ( $aw$ ) im Anfangsjahr eingegeben.

$$EEB_{ww}(t) = aw + [zw - aw] \cdot \left[\frac{t-1990}{2010-1990}\right] \quad \text{mit } aw: 3,1 \text{ MWh/a} \quad \text{Gl. D-1.4}$$

$zw: 1,8 \text{ MWh/a}$

#### Anpassungen

Keine

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Kochen ( $EEB_{ko}$ )

Hier wurde die Funktion *Interpolation* verwendet.

$$EEB_{ko}(t) = aw + [zw - aw] \cdot \left[\frac{t-1990}{2010-1990}\right] \quad \text{Gl. D-1.5}$$

mit  $aw: 0,8 \text{ MWh/a}$ ,  $zw: 0,9 \text{ MWh/a}$  und  $2001 < t < 2010$

#### Anpassungen

Keine

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Beleuchtung und Elektrogeräte ( $EEB_{be}$ )

Hier wurde die Funktion *Interpolation* verwendet.

$$EEB_{be}(t) = aw + [zw - aw] \cdot \left[\frac{t-1990}{2010-1990}\right] \quad \text{Gl. D-1.6}$$

mit  $aw: 1,8 \text{ MWh/a}$ ,  $zw: 1,9 \text{ MWh/a}$  und  $2001 < t < 2010$

#### Anpassungen

Keine

#### Zusätzliche Berechnungen

Mit Hilfe von LEAP kann die Entwicklung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen ( $\text{CO}_2$ ) berechnet werden. Hierbei wird eine Multiplikation zwischen dem gesamten Primärenergiebedarf ( $PEB$ ) und den Emissionsfaktoren ( $EF$ ) nach Energiequelle ( $q$ ) durchgeführt.

$$\text{CO}_2 = \sum PEB_q \cdot EF_q \quad \text{Gl. D-1.7}$$

#### Anpassungen

Keine

#### Zusätzliche Anpassungen/ Annahmen zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor

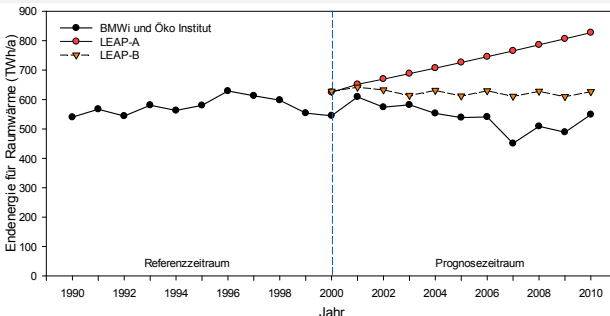
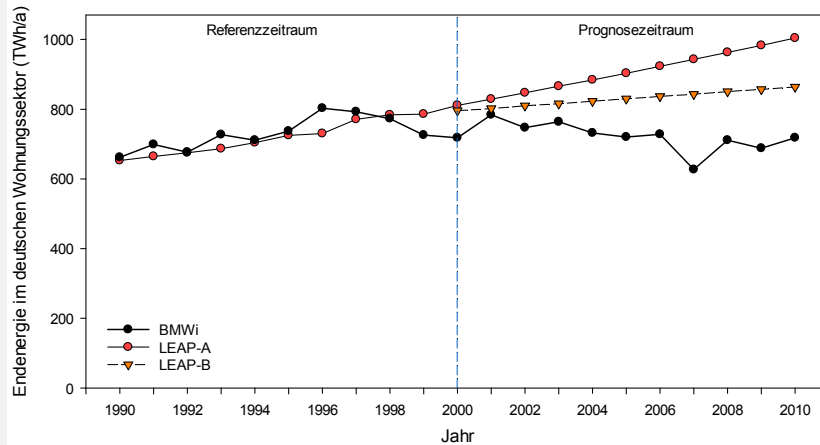


Abbildung D-1.1 zeigt die erste Simulation mit LEAP (LEAP-A), welche eine positive Wachstumsrate von 0,86% für raumwärme verwendet. Die Wachstumsrate des Energieverbrauchs für Raumwärme wurde im Folgenden korrigiert und eine neue Simulation durchgeführt (LEAP-B). Die Korrektur der Tendenz wurde auf Basis der folgenden Kriterien vorgenommen: a) In relation zu den Anforderungen der EnEV wird eine negative jährliche Wachstumsrate des Endenergieverbrauchs von 3% in neuen Wohnungen berücksichtigt. b) Die Anzahl der sanierten Wohnungen ab dem Jahr 2001 beträgt eine Mio. Wohnungen pro Jahr [31].

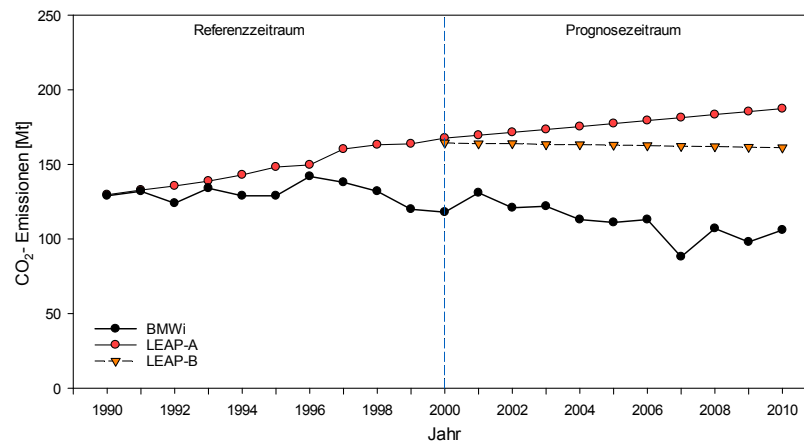
Abbildung D-1.1 Vergleich zwischen der mit LEAP simulierten Entwicklung des Endenergiebedarfs für Raumwärme und den statistischen Daten nach BMWi

## Ergebnisse

### Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor



### Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im deutschen Wohnungssektor



Die prinzipielle Begrenztheit des Modells entsteht im Moment der Verwendung von Szenarien, da LEAP diese Szenarien durch Projektionen von Tendenzen integriert und nicht in der Lage ist, zeitliche Veränderungen des Endenergiebedarfs anzunehmen, wie zum Beispiel die Änderung des Heizenergieverbrauchs, bedingt durch verschiedene Jahreszeiten oder die Veränderung der Gradtagszahl in den Folgejahren. Simulationen mit LEAP verwenden häufig "Tendenzen zur Szenarientwicklung", um den zukünftigen Endenergiebedarfs zu berechnen, so z.B. Korea [7] Thailand [8], Peru [5], Mexico [4], Indien [6] (Abbildung D-1.2).

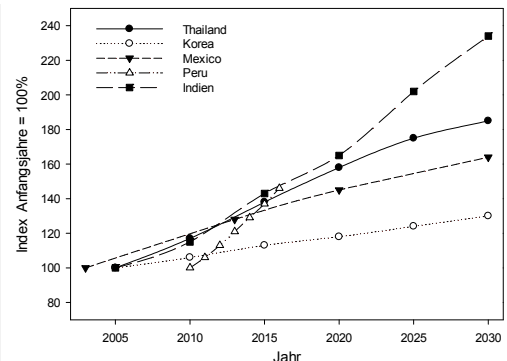


Abbildung D-1.2 Ergebnisse der Berechnung des zukünftigen Endenergiebedarfs mit LEAP in verschiedenen Ländern, basierend auf [4-8].

**Sensitivitätsanalyse**

<b>Eingangsparameter</b>	<b>Anfangswert</b>	<b>normalisierter Sensitivitätskoeffizient</b>
Wohneinheiten (Tsd.)	35.454	1
Spezifischer Endenergiebedarf pro Wohnung nach Nutzungsbereichen (MWh/WE)		
Raumwärme	16,78	0,75
Warmwasser	2,37	0,11
Elektrogeräte	1,54	0,07
Kochen	0,86	0,04
Beleuchtung	0,32	0,01
Jahresnutzungsgrad (%)		
Raumwärme	0,8	-0,82
Warmwasser	0,74	-0,14
Elektrogeräte	1,54	-0,05
Kochen	0,86	-0,03
Beleuchtung	0,32	-0,01

**FfE-Gebäudemodell** Forschungsstelle für Energiewirtschaft- Gebäudemodell

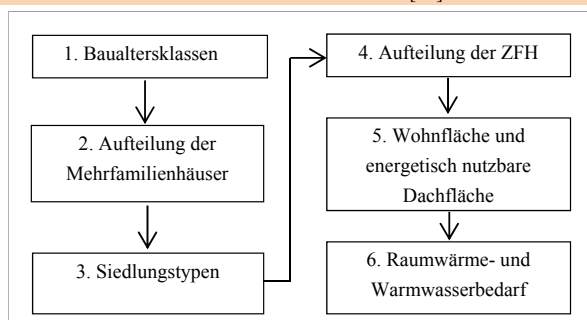
Entwickler: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), Deutschland. [16]

Modellansatz: statistisch

Land: Deutschland

Jahr: 2012

Kernrechner: keiner

**Struktur des FfE-Gebäudemodells** basierend auf [16]**Beschreibung des Modells**

Das FfE-Gebäudemodell ermöglicht es, auf Basis von verfügbaren statistischen Daten und Verteilungsschlüsseln (Gebäude und Wohnflächen je Gebäudetyp und Wohneinheit, Dachfläche der Wohngebäude, Lage der Gebäude unterteilt in Siedlungstyp, spezifische Raumwärme- und Warmwasserbedarfswerte), differenzierte Aussagen zum Wohngebäudesektor in Deutschland, wie z.B. der Bestimmung des Energiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser oder der Ermittlung nutzbarer Dachflächen für solare Anwendungen zu treffen [16]. Im Jahr 2012 wurde das Modell zur Ermittlung von nutzbaren Dachflächen für solare Anwendungen verwendet [16]. Hierbei wurde die energetisch nutzbare Dachfläche der Wohngebäude in Deutschland, aggregiert auf Bundeslandebene, gezeigt.

Zur Modellierung werden sechs Schritte (s. Struktur des Modells) durchgeführt. Im ersten Schritt wird der Gebäudebestand in zehn Baualtersklassen aufgegliedert. Hierfür werden Daten der Studie „Lokal-Statistik 2008“, die den Gebäudebestand in drei Gebäudetypen (Einfamilienhaus (EFH), Zweifamilienhaus (ZFH) und Mehrfamilienhaus (MFH)) unterteilt, verwendet. Zur Klassifizierung der Gebäudetypen in die verschiedenen Baualtersklassen wurden statistische Daten der Volkszählung im Jahr 1987 (Statistisches Bundesamt, 1987) und der Regionaldatenbank (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2009) herangezogen. In beiden Datenquellen sind Daten zu Gebäuden, nach Baujahren aufgegliedert, vorhanden. Im zweiten Schritt wird im FfE-Gebäudemodell der Gebäudetyp „Mehrfamilienhaus“ nochmals in drei verschiedene Gebäudetypen (kleines Mehrfamilienhaus, mittleres Mehrfamilienhaus und großes Mehrfamilienhaus) unterteilt. Die Unterteilung wurde auf Basis von internen Studien der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH [44-46] durchgeführt. Diese Studien liefern eine Häufigkeitsverteilung von Wohneinheiten in Mehrfamilienhäusern. Im dritten Schritt unterteilt das FfE-Gebäudemodell den Gebäudebestand auf Basis der Studie „Pluralistische Wärmeversorgung“ in neun Siedlungstypen (Streusiedlung, Einfamilienhaussiedlung, Dorfkern, Reihenhaussiedlung, Zeilenbebauung 3-bis 5-geschossig, Hochhäuser und große Zeilenbauten, städtische Blockrandbebauung, City-Bebauung hoher Dichte, historische Altstadt). Die unterschiedlichen Siedlungstypen werden genutzt, um zu bestimmen, in welchem Maße sich eine Wohnbebauung für eine Fernwärme- oder Erdgasversorgung eignet. Im vierten Schritt werden im FfE-Gebäudemodell zwischen „echten“ Zweifamilienhäusern und Doppelhäusern (DH) unterschiedet. Hierbei werden die Zweifamilienhäuser in Doppelhäuser (DH), Reihenhäuser (RH) und Zweifamilienhäuser (ZFH) unterteilt. Nach der neuen Einteilung der ZFH sind insgesamt sieben Gebäudetypen (EFH, ZFH, DH, RH und drei MFH) vorhanden. Diese sieben Gebäudetypen werden nach neun Siedlungstypen und zehn Baualtersklassen differenziert. In Schritt 5 wird die gesamte Dachfläche durch die Bestimmung des Verhältnisses von Grundfläche zur Dachfläche ermittelt. Die Berechnung der nutzbaren Dachfläche ist insofern nützlich, da mit diesem Wert das Potenzial für Solarthermie bzw. Photovoltaik ermittelt werden kann. Im sechsten Berechnungsschritt des FfE-Gebäudemodells werden die spezifischen Werte für den Raumwärmebedarf und den Warmwasserbedarf je nach Gebäudetyp und Baualtersklasse bestimmt. Zur Bestimmung der spezifischen Werte für den Raumwärme- und Warmwasserbedarf wurden die Studien von Fieger et al. [44], Gobmaier und Corradine [45] verwendet. Diese Studien beinhalten Informationen zur Wärmeversorgungsstruktur sowie zum Endenergiebedarf in Wohngebäuden. Aus diesem Grund ist eine Mittelwertbildung des Endenergiebedarfs, bezogen auf die Wohnfläche, möglich. In Schritt sechs wird verdeutlicht, dass die Bestimmung des spezifischen Raumwärmebedarfs je Wohnfläche sich auf den aktuell gültigen Endenergiebedarf der Gebäude bezieht. Daraus folgt, dass eventuelle Sanierungen am Gebäude durch die Mittelwertbildung über dem Gebäudebestand bereits berücksichtigt sind. Abschließend ist noch zu erwähnen, dass der Endenergiebedarf für Warmwasser vom Alter des Gebäudes unabhängig ist und dass in großen Wohngebäuden mit kleineren Wohneinheiten der flächenspezifische Energiebedarf für Warmwasser leicht ansteigt.

### Berechnungsmethoden

#### Unterteilung des Wohnungsbestandes

Im FfE-Gebäudemodell wird der gesamte deutsche Gebäudebestand in zehn Baualtersklassen (vor 1990, 1990-1945, 1946-1960, 1961-1970, 1971-1980, 1981-1985, 1986-1995, 1996-2000, 2001-2005, 2006-2010) und sechs Gebäudetypen (EFH, DH, RH, ZFH, MFH mit 3 bis 6 Wohnungen, MFH mit 7 bis 12 Wohnungen, MFH mit mehr als 12 Wohnungen) aufgliedert. Die Autoren des FfE-Gebäudemodells haben für die Entwicklung der Anzahl der Gebäude eine Wachstumsrate von 0,5% ermittelt, jedoch wurde eine Berechnungsmethode, um die zukünftige Anzahl der Gebäude zu ermitteln, nicht veröffentlicht.

#### Anpassungen

Für die Entwicklung der zukünftigen Anzahl der Gebäude wurde die Gleichung D-1.2 umgeschrieben (in Gleichung D-2.1) und mit einer Wachstumsrate von 0,5% verwendet.

$$GB_{a,s}(t) = GB_{t_R} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{GR}{100} \right) \right]^{(t-t_R)}$$

Gl. D-2.1

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme (EEB<sub>rw</sub>)

Zur Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme wird die Summe des Nutzenergiebedarfs für jede Gebäudegruppe nach Gebäudetyp (GT) und Baualtersklasse (BA) berechnet und durch den Nutzungsgrad ( $n$ ) geteilt (Gl. D-2.2). Der Nutzenergiebedarf wird durch eine Multiplikation zwischen der Anzahl der Gebäude (AG), einer durchschnittlichen Wohnfläche und eines spezifischen Verbrauchskennwerts (SV) nach Gebäudetyp (GT) und Baualtersklasse ermittelt. Die spezifischen Verbrauchskennwerte des FfE-Gebäudemodells können in Anhang C-8 gefunden werden.

$$EEB_{rw,GT,BA} = \frac{\sum AG_{GT,BA} \cdot \overline{Wf_{GT,BA}} \cdot SV_{GT,BA}}{n}$$

Gl. D-2.2

#### Anpassungen

Fehlende Daten der Entwicklung des Nutzungsgrades wurden ergänzt mit der Methode in Anhang C.2 ermittelten Daten.

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Warmwasser (EEB<sub>ww</sub>)

Zur Bestimmung des Endenergiebedarfs für Warmwasser wird dasselbe Verfahren wie bei der Raumwärme verwendet. Zur Anwendung kommen hierbei die spezifischen Verbrauchskennwerte für Warmwasser aus Anhang C-8).

#### Anpassungen

Fehlende Daten der Entwicklung des Nutzungsgrades wurden ergänzt mit der Methode in Anhang C.2 ermittelten Daten.

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Kochen (EEB<sub>ko</sub>), Beleuchtung und Elektrogeräte (EEB<sub>be</sub>)

Keine Berechnungsmethode vorhanden.

#### Anpassungen

Einbeziehung von statistischen Daten für den Endenergiebedarf im diesem Bereich.

#### Zusätzliche Anpassungen/ Annahmen zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor

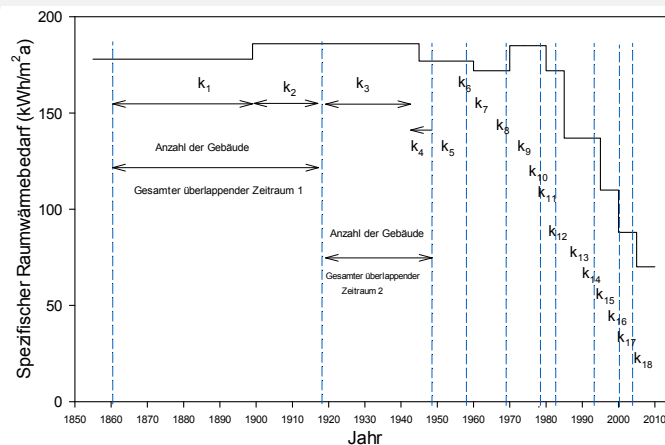


Abbildung D-2.1 Bestimmung der Korrekturfaktoren für den überlappenden Zeitraum.

Die ursprüngliche Studie von Corradini et al. [16] liefert keine Daten zur durchschnittlichen Wohnfläche nach Gebäudetyp und Baualtersklasse. Aus diesem Grund wurde eine Anpassung zwischen den Daten von Corradini et al. [16] und der letzten Fassung der Deutschen Gebäudetypologie vom IWU [41] durchgeführt. Hierbei wurde ein Unterschied zwischen der Baualtersklassenklassifizierung nach Corradini et al. und der nach IWU festgestellt. Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Arbeit Korrekturfaktoren entwickelt, um die Klassifizierung auf die Baualtersklassen nach Corradini et al. abzustimmen. Dabei werden die Zeiträume der Baualtersklassen mit Hilfe der Korrekturfaktoren unterteilt, die proportional zur Länge des überlappenden Zeitraums sind. Dies wird in Abbildung D-2.1 verdeutlicht, in der der spezifische Raumwärmebedarf für ein Einfamilienhaus nach den Baualtersklassen von Corradini et al. abgebildet wird.

Die vertikalen blauen Linien stellen die Klassifizierung der Baualtersklasse nach IWU (Anhang C-5) dar. In der Abbildung D-2.1 werden darüber hinaus die Zeiten der Überlappung angezeigt, die als mathematische Korrekturfaktoren bezeichnet werden ( $K_i$ ). Die Korrekturfaktoren wurden in Relation zur Jahresdauer eines überlappenden Zeitraums (Jahre nach Baualtersklasse von Corradini et al. über den gesamten Zeitraum nach IWU) festgelegt. Insgesamt wurden 18 Korrekturfaktoren bestimmt. Aus Abbildung D-2.1 geht hervor, dass der Energieverbrauch in jedem Zeitraum unter der Anpassung der Gleichung D-2.2 bestimmt werden kann. Diese Anpassung beinhaltet einen Korrekturfaktor bezüglich des entsprechenden Zeitraums. Die Anzahl der Gebäude eines bestimmten Zeitraums nach IWU kann mit dem entsprechenden Korrekturfaktor multipliziert werden, um die entsprechende Gebäudeanzahl in den korrespondierenden Zeiträumen der Baualtersklasse nach Corradini et al. bestimmen zu können (Gl. D-2.2). In Anhang C-14 werden die überlappenden Zeiträume, die Korrekturfaktoren, die angepasste Anzahl der Wohnungen und die angepasste Wohnfläche zur Klassifizierung nach Baualtersklassen von Corradini et al. [16] dargestellt.

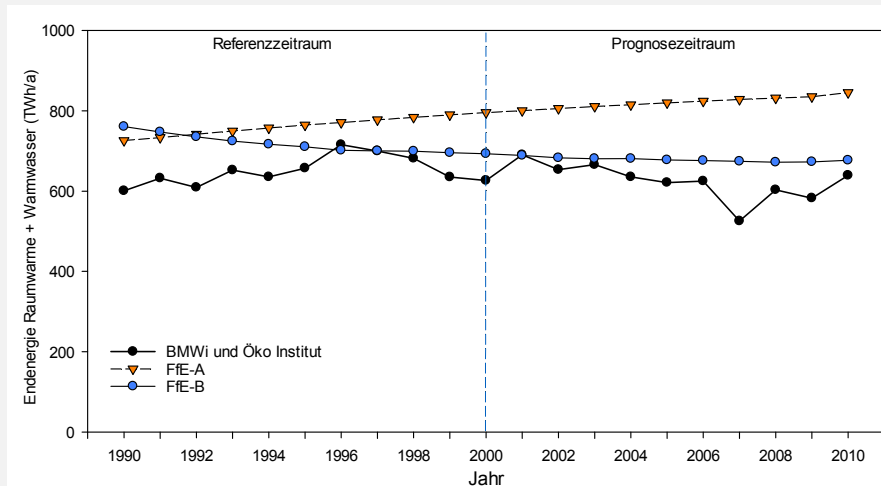
$$EEB_{rw,GT,BA} = \frac{\sum AG_{GT,BA} \cdot \overline{Wf_{GT,BA}} \cdot SV_{GT,BA}}{n} \cdot k_i$$

Gl. D-2.2



## Ergebnisse

### Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor



## Anmerkungen

Die Ergebnisse der Bestimmung des Endenergiebedarfs unter Anwendung der Gleichung D-2.2 (FfE-A) und die Daten zum Nutzungsgrad von Beer [25] und FfE [35] im Vergleich mit den tatsächlichen Ergebnissen (Öko-Institut und Fraunhofer ISI, 2011) weisen einen relativen Abweichungsfehler von bis zu 68 % auf. Beer [25] verwendete im Jahr 2012 das FfE-Gebäudemodell, um den Endenergiebedarf im deutschen Wohnungssektor zu berechnen. Die Berechnung wurde mit Hilfe von Daten zum Nutzungsgrad aus der Studie „Vergleich zentraler und dezentraler Warmwasserversorgung“ der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. [35] durchgeführt. Diese Daten zum Nutzungsgrad wurden durch eine messtechnische Untersuchung von Systemen zur zentralen und dezentralen Warmwasserversorgung durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft im Jahr 2003 erstellt. Die Messungen erfolgten bei 15 Wohngebäuden unterteilt nach Gebäudetyp (5 Einfamilienhäuser, 3 Zweifamilienhäuser, 1 Reihenhäuser und 6 Mehrfamilienhäuser) und Baujahr (im Zeitraum zwischen 1963 und 1999). Diese Studie zeigt unterschiedliche Werte für den Nutzungsgrad des Warmwasserbereiters (Gaskessel, NT-Gas-Kombi-Kesseltherme und Elektro-Wandspeicher), aber sie zeigt keine Entwicklung des Nutzungsgrades (der durchschnittliche Nutzungsgrad aller gemessenen Warmwasserbereiter beträgt 67%) im gesamten Zeitraum, der in dieser Arbeit betrachtet wird (1990-2010). Das heißt, dass die Verwendung eines einzelnen Mittelwerts für den Nutzungsgrad und die damit verbundene Vernachlässigung der Entwicklung des Nutzungsgrades über den gesamten Zeitraum zu einem Fehler in den Ergebnissen führt. Auf Grund der Ungenauigkeit der Ergebnisse bei der Verwendung des Nutzungsgrades aus der Studie der Forschungsstelle für Energiewirtschaft werden die Daten zur Entwicklung des Jahresnutzungsgrades aus Anhang C-2 verwendet (FfE-B).

**Sensitivitätsanalyse**

Eingangsparameter	Anfangsw	normertalisierter Sensitivitätskoeffizient
Anzahl Wohnungen (Tsd.)		
EFH	12.264	0,89
RH	5.797	0,34
MFH	16.495	0,64
GMH	4.675	0,16
Spezifischer Raumwärmebedarf (KWh/m²a)		
EFH	148	0,29
RH	141	0,31
MFH	123	0,51
GMH	119	0,12
Spezifischer Warmwasserbedarf (KWh/m²a)		
EFH	18	0,10
RH	20	0,05
MFH	26	0,12
GMH	26	0,03
Mittlere Wohnfläche je Haus-Archetyp (m²)		
EFH	111	0,86
RH	83	0,30
MFH	72	0,68
GMH	61	0,16
Jahresnutzungsgrad (%)		
Raumwärme	0,79	-0,77
Warmwasser	0,73	-0,29

# **REM Regional Engineering Model**

Entwickler: University of Joensuu. [15]

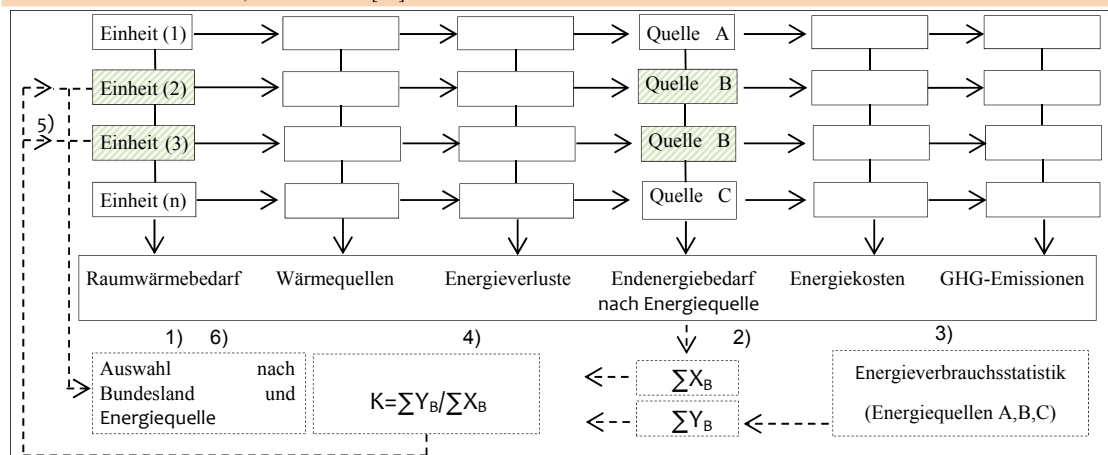
Modellansatz: statistisch

Land: Finnland

Jahr: 2000

Kernrechner: keiner

## **Struktur des REM-Modells, basierend auf [15]**



## **Beschreibung des Modells**

Mit Hilfe des REM-Modells kann der jährliche Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser im Wohnungssektor bestimmt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, sowohl die Treibhausgas-Emissionen als auch die Nutzungskosten für die verwendete Energie zu berechnen. Das Modell wurde in der Region Nord-Karelien (Finnland) getestet und enthält Daten aller Gebäude dieser Region beziehungsweise deren Energiequellen. REM ist ein Modell, welches durch Anpassung des berechneten Wärmeverbrauchs jeder Einheit an statistische Daten kalibriert werden kann (s. Struktur des Modells). Die Verfahrensschritte einer Kalibrierung sind:

- 1) Auswahl der zu kalibrierenden Gebäude und Einstellung der Startwerte für den Wärmeverbrauchsparameter (beliebige Zahl  $> 0$ ).
- 2) Summierung des Energieverbrauchs für die gewählten Einheiten mit gleicher Quelle (Im Beispiel werden die Energieverbräuche von Einheit 2 und 3 mit gleicher Energiequelle B summiert:  $\sum X_B$ ).
- 3) Sammeln und Summierung von statistischen Daten zur verwendeten Energiequelle (Im Beispiel werden Daten zur Energiequelle B gesammelt und summiert:  $\sum Y_B$ ).
- 4) Bildung des Kalibrierungskoeffizienten K (Quotient aus der Summe der statistischen und der berechneten Daten; z.B:  $K = \sum Y_B / \sum X_B$ ).
- 5) Multiplikation des Wärmeverbrauchs mit dem Kalibrierungskoeffizienten.
- 6) Wahl einer anderen Auswahl von Gebäuden und Wiederholung des Verfahrens mit einer anderen Energiequelle.

Das Modell verwendet zur Berechnung „Einheiten“. Eine Einheit besteht aus einer Reihe von Gebäuden mit ähnlichen Eigenschaften in Bezug auf ihren Wärmeverbrauch. Die Größe einer Einheit setzt sich aus der Summe der Grundfläche aller Gebäude (in  $m^2$ ) zusammen. In der ersten Phase der Modellierung erfolgt die Formulierung der so genannten „beheizten Ketten“ für alle Einheiten (Abbildung D-3.1).

Die Funktion dieser Ketten ist es, die Umrechnung des jährlichen Endenergiebedarfs im Bereich Raumwärme und Warmwasser (in  $kWh/m^2/a$ ) in verschiedene Brennstoffe (MJ) oder in Strom (in MWh), vorzunehmen. Der Endenergiebedarf wird für jede Einheit unterteilt in verwendete Heizungssysteme. Diese Heizungssysteme werden weiter untergliedert in Wärmequellen, die unterschiedliche Nutzungsgrade aufweisen. Die Kosten und die THG-Emissionen werden berechnet durch die Multiplikation zwischen der Menge von Brennstoffen (MJ) oder Strom (in MWh) und den Energiepreisen bzw. Emissionsfaktoren.

### Berechnungsmethoden

#### Unterteilung des Wohnungsbestandes

Da im REM-Modell eine Einheit aus einer Reihe von Gebäuden mit ähnlichen Eigenschaften bezüglich ihres Wärmeverbrauchs besteht, wurden in dieser Arbeit die Daten der Studie „Deutsche Gebäudetypologie“ von IWU verwendet. In dieser Studie wird der gesamte Wohnungsbestand in 32 Gebäudetypen unterteilt. Zur Bestimmung der zukünftigen Szenarien der Entwicklung des Endenergiebedarfs in Nord-Karelien wurde vom Autor des REM-Modells (J. Snäkin) eine Wachstumsrate der Anzahl der Gebäude von 1% bis 3% betrachtet. Eine Formel zur Bestimmung der zukünftigen Anzahl der Gebäude wurde nicht veröffentlicht.

#### Anpassungen

Für die Entwicklung der zukünftigen Anzahl der Gebäude wurde die Gleichung D-2.1 mit einer Wachstumsrate von 0,5% verwendet, um den deutschen Wohnungssektor abzubilden.

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme ( $EEB_{rw}$ ) und Warmwasser ( $EEB_{ww}$ )

Der Nutzenergiebedarf im Bereich Raumwärme wird durch die Multiplikation des spezifischen Nutzenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser (SNEVK) mit der gesamten Wohnfläche (GWF) nach Gebäudetyp (s) berechnet. Unter der Betrachtung des Nutzungsgrades ( $n$ ) wird der Endenergiebedarf bestimmt. Die Summe des Endenergiebedarfs aller Gebäudetypen weist den gesamten Endenergiebedarf auf (Gleichung D-3.1.)

$$EEB_{rw} = \sum \frac{SNEVK_s \cdot GWF_s}{n} \quad \text{Gl. D-3.1}$$

#### Anpassungen

Die Daten des spezifischen Endenergieverbrauchs pro Gebäudetyp bezüglich des deutschen Wohnungssektors wurden aus Anhang C-8 entnommen.

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Kochen ( $EEB_{ko}$ ), Beleuchtung und Elektrogeräte ( $EEB_{be}$ )

Keine Berechnungsmethode vorhanden.

#### Anpassungen

Einbeziehung von statistischen Daten für den Endenergiebedarf im diesem Bereich.

#### Zusätzliche Berechnungen

Mit Hilfe von REM können die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen (CO<sub>2</sub>) und die Energiekosten berechnet werden. Zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen wird dasselbe Verfahren wie bei LEAP (Gl. D-1.6) verwendet und die Ermittlung der Energiekosten (EK) wird durch eine Multiplikation zwischen dem gesamten Primärenergiebedarf (PEB) und dem Energiepreis (EP) nach Energiequelle (q) durchgeführt (Gleichung D-3.2).

#### Anpassungen

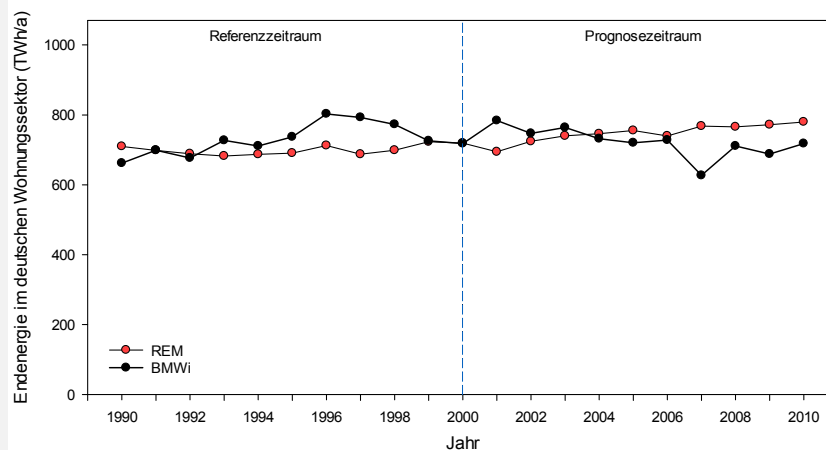
keine

#### Zusätzliche Anpassungen/ Annahmen zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor

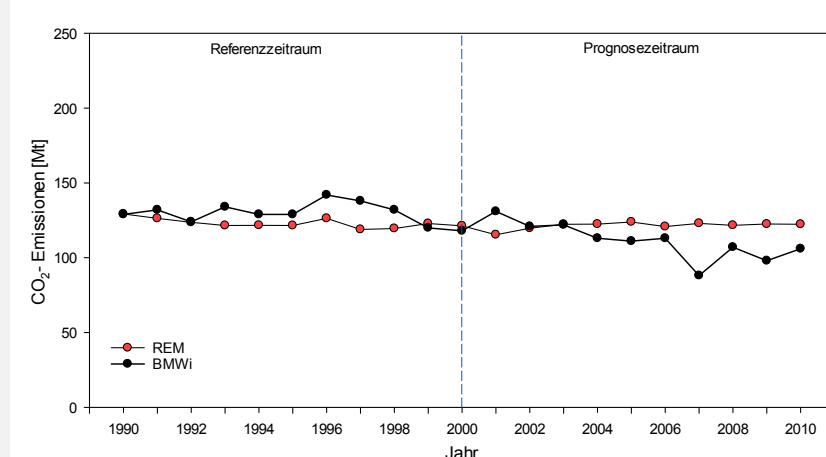
Daten und Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Entwicklung des Nutzungsgrades von Heizungsanlagen wurden nicht veröffentlicht. Daher wurden in dieser Arbeit die ermittelten Daten des Nutzungsgrades aus Kapitel 3 verwendet (s. Anhang C-2).

## Ergebnisse

### Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor



### Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im deutschen Wohnungssektor



## Anmerkungen

Die dargestellten Ergebnisse betrachten den mit dem REM- Modell berechnete Endenergiebedarf im Bereich Raumwärme und Warmwasser unter Ergänzung des statistischen Daten des BMWi für den Endenergiebedarf für Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung.

**Sensitivitätsanalyse**

Eingangsparameter		Anfangswert	normalisierter Sensitivitätskoeffizient
Wohnfläche (Mio. m <sup>2</sup> )			
Vor 1. Wärmeschutzverordnung (vor 1979)	EFH	940	0,37
	RH	345	0,09
	MFH	696	0,23
	GMH	269	0,08
1. Wärmeschutzverordnung (1979-1983)	EFH	111	0,02
	RH	47	0,01
	MFH	69	0,02
	GMH	39	0,01
2. Wärmeschutzverordnung (1984-1994)	EFH	148	0,03
	RH	66	0,02
	MFH	76	0,03
	GMH	84	0,02
3. Wärmeschutzverordnung (1995-2000)	EFH	130	0,02
	RH	53	0,02
	MFH	102	0,02
Spezifische Nutzenergieverbrauchskennwerte für Raumwärme (KWh/m <sup>2</sup> a)			
Vor 1. Wärmeschutzverordnung (vor 1979)	EFH	210	0,37
	RH	146	0,09
	MFH	163	0,23
	GMH	121	0,08
1. Wärmeschutzverordnung (1979-1983)	EFH	119	0,02
	RH	134	0,01
	MFH	117	0,02
	GMH	88	0,01
2. Wärmeschutzverordnung (1984-1994)	EFH	142	0,03
	RH	93	0,02
	MFH	123	0,03
	GMH	81	0,02
3. Wärmeschutzverordnung (1995-2000)	EFH	108	0,02
	RH	69	0,02
	MFH	85	0,02
Spezifische Nutzenergieverbrauchskennwerte für Warmwasser (KWh/m <sup>2</sup> a)			
	EFH	13	0,02
	RH	15	0,01
	MFH	19	0,03
	GMH	19	0,01
Jahresnutzungsgrad (%)			
	Raumwärme	0,80	-0,91
	Warmwasser	0,74	-0,1

### BSM Building-Stock-Model

Entwickler: Lehrstuhl Energy Economics der Karlsruhe Institute of Technology (KIT). [27]

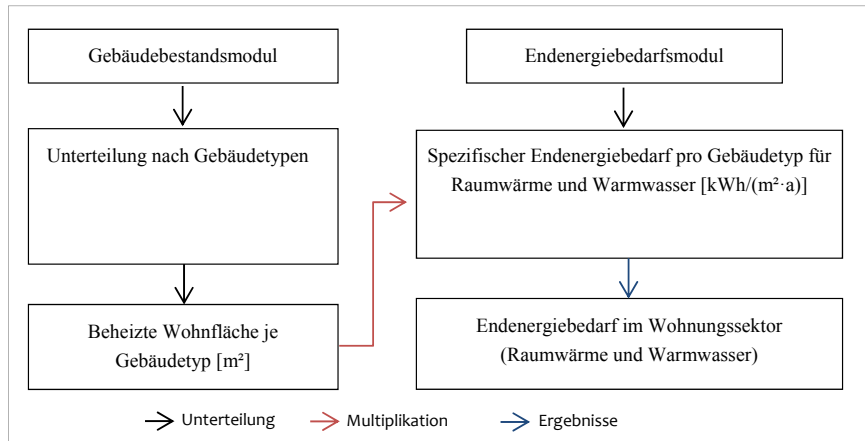
Modellansatz: statistisch

Land: Deutschland

Jahr: 2013

Kernrechner: keiner

### Struktur des BSM-Modells, basierend auf [27]



### Beschreibung des Modells

Das BSM-Modell besteht aus zwei Modulen: einen Modul zur Unterteilung und Bestimmung des Gebäudebestandes (Gebäudebestandsmodul) und einem weiteren zur Unterteilung des spezifischen Endenergiebedarfs nach Gebäudtyp (Endenergiebedarfsmodul). Im Endenergiebedarfsmodul werden Endenergieverbrauchskennwerte für Raumwärme und Warmwasser verwendet. Die Daten der Endenergieverbrauchskennwerte wurden von McKenna et al. [27] ermittelt und stammen aus der Studie „Energieeinsparung bei Alt- und Neubauten“ [39].

Im Gebäudebestandsmodul wird der gesamte Gebäudebestand in zehn Baualtersklassen aufgegliedert (vor 1919, 1919-1948, 1949-1957, 1958-1968, 1969-1978, 1979-1983, 1984-1990, 1991-1995, 1996-2000, 2001-2010). Hierfür werden Daten der Studie „Deutsche Gebäudetypologie, Systematik und Datensätze“ [17] und „Mikrozensus und Zusatzerhebung 2006“ [48] verwendet, um den gesamte Gebäudebestand in drei Gebäudetypen (Einfamilienhaus (EFH), Zweifamilienhaus (ZFH), Mehrfamilienhaus (MFH), Großes Mehrfamilienhaus (GMFH)) zu unterteilen. Zusammen mit der Anzahl der Gebäude nach Gebäudtyp wird im Gebäudebestandsmodul die beheizte Wohnfläche je Gebäudtyp ermittelt. Danach wird der Endenergiebedarf durch die Multiplikation zwischen dem spezifischen Endenergiebedarf und der durchschnittlichen beheizten Wohnfläche nach Gebäudtyp berechnet. Aus der Summe des Endenergiebedarfs alle Gebäudetypen wird der gesamte Endenergiebedarf im Wohnungssektor ermittelt.

Projektionen der möglichen Entwicklung der Anzahl der Gebäude bzw. des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor für Raumwärme und Warmwasser wurden mit Hilfe des BSM bis 2050 bestimmt. Unter der Annahme, dass bis 2030 nicht mehr als 3,6 Billionen m² Wohnfläche entstehen und die Sanierungsrate hoch ist (bis 4%), wird prognostiziert, dass der gesamte Endenergiebedarf im Wohnungssektor für Raumwärme und Warmwasser von 617 TWh/a im Jahr 2010 auf 366 TWh/a im Jahr 2050 sinkt.

### Berechnungsmethoden

#### Unterteilung des Wohnungsbestandes

Im Gebäudebestandsmodul des BSM-Modells wird die Gesamtanzahl der Gebäude im Jahr  $t$  in repräsentative Gebäudetypen unterteilt.

Zur Bestimmung der zukünftigen Anzahl der Gebäude wird der Gesamtgebäudebestand im Jahr  $t$  verwendet erhalten unter Berücksichtigung der Anzahl der abgerissenen Gebäude im Jahr  $t$  sowie der Anzahl der Neubauten im Jahr  $t$ . Die Anzahl der abgerissenen Gebäude und die Prognose für die Anzahl der neuen Gebäude werden mit Hilfe der Gleichung D-4.1 berechnet, die den Bau von neuen Gebäuden im Verhältnis zum Abriss oder Ersatzbau betrachtet. Die Daten zur Bestimmung der zukünftigen Anzahl der Gebäude werden aus verschiedenen Studien [11-14] erhalten, die den deutschen Gebäudebestand beschreiben.

$$GB_{tot,s,r}(t) = \sum_a \left( GB_{a,s,r,t_R} - A_{meb,a,s,r}(t) - A_{oeb,a,s,r}(t) \right) + \sum_{2010}^z NB_{df,s,r}(t) + \sum_{2010}^z NB_{eb,s,r}(t) \quad \forall z \in \{2010, \dots, 2050\} \quad \text{Gl. D-4.1}$$

Darin ist:

$GB_{tot,s,r}(t)$	: gesamte Anzahl der Gebäude im Jahr $t$
$GB_{a,s,r,t_R}$	: Anzahl der Gebäude im Referenzjahr $t_R$
$A_{meb,a,s,r}(t)$	: Abriss mit Ersatzbau im Jahr $t$
$A_{oeb,a,s,r}(t)$	: Abriss ohne Ersatzbau im Jahr $t$
$NB_{df,s,r}(t)$	: Neubauten auf Basis demografischer Faktoren im Jahr $t$
$NB_{eb,s,r}(t)$	: Neubauten Ersatzbau im Jahr $t$
$a$	: Baujahr
$s$	: Gebäudetyp
$r$	: Region

#### Anpassungen

keine

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme( $EEB_{rw}$ ) und Warmwasser ( $EEB_{ww}$ )

Der Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser wird durch die Multiplikation des spezifischen Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser (SEVK) mit der durchschnittlichen beheizten Wohnfläche ( $\overline{bWF}$ ) und Anzahl der Gebäude (GB) nach Gebäudetyp ( $s$ ) berechnet. Die Summe des Endenergiebedarfs aller Gebäudetypen stellt den gesamten Endenergiebedarf dar (Gleichung D-4.2).

$$EEB_{rw,ww} = \sum SEVK_s \cdot \overline{bWF}_s \cdot GB_s \quad \text{Gl. D-4.2}$$

#### Anpassungen

keine

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs im Bereich Kochen ( $EEB_{ko}$ ), Beleuchtung und Elektrogeräte ( $EEB_{be}$ )

Keine Berechnungsmethode vorhanden

#### Anpassungen

Einbeziehung von statistischen Daten für den Endenergiebedarf im diesem Bereich.

#### Zusätzliche Berechnungen

keine

#### Anpassungen

keine

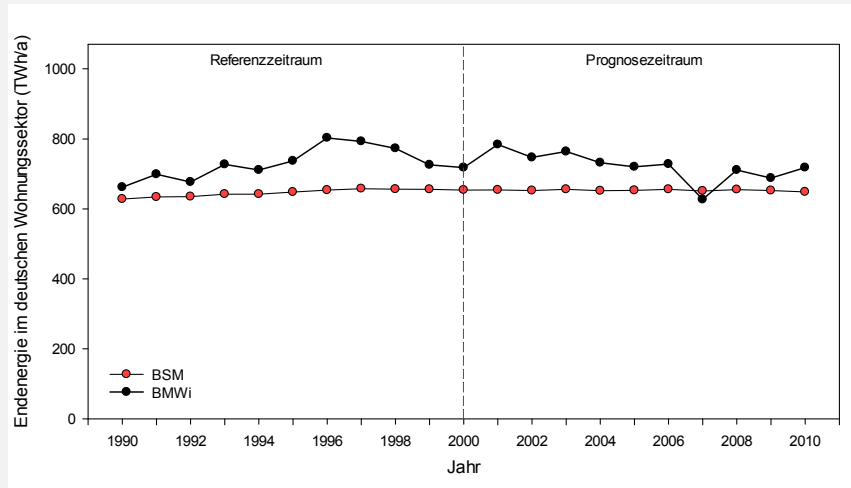
#### Zusätzliche Anpassungen/ Annahmen zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor

keine



## Ergebnisse

### Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor



## Anmerkungen

Die betrachteten Werte für die Wohnfläche je Gebäudetyp wurden um 20% verkleinert, um die beheizte Wohnfläche zu ermitteln. Der Unterschied zwischen beheizter Wohnfläche und Wohnfläche (20%) wurde durch das Institut Wohnen und Umwelt (IWU) [17] definiert. Die dargestellten Ergebnisse betrachten den mit dem BSM-Modell berechneten Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser unter Ergänzung der statistischen Daten des BMWi für den Endenergiebedarf für Kochen, Elektrogeräte und Beleuchtung.

**Sensitivitätsanalyse**

Eingangsparameter	Anfangswert	normalisierter Sensitivitätskoeffizient
Anzahl der Gebäude (Tsd.)		
EFH	8494	0,48
RH	3866	0,16
MFH	2571	0,27
GMH	259	0,09
Spezifische Endenergieverbrauchskennwerte für Raumwärme und Warmwasser (KWh/m²a)		
EFH	268	0,49
RH	230	0,16
MFH	209	0,27
GMH	153	0,09
Durchschnittliche beheizte Wohnfläche (KWh/m²a)		
EFH	122	0,48
EFH	102	0,16
RH	287	0,27
MFH	1268	0,09
Wachstumsrate (%)		
EFH	1	0,005
EFH	1	0,002
RH	1	0,002
MFH	1	0,001
Sanierungsrate (%)		
EFH	0,2	-0,001
EFH	0,2	-0,003
RH	0,12	-0,003
MFH	0,12	-0,002
Abrissrate (%)		
EFH	0,04	-0,001
EFH	0,04	-0,002
RH	0,04	-0,002
MFH	0,04	-0,000

### MAED-2 Model for Analysis of Energy Demand

Entwickler: IAEA—International Atomic Energy Agency, Österreich. [9]

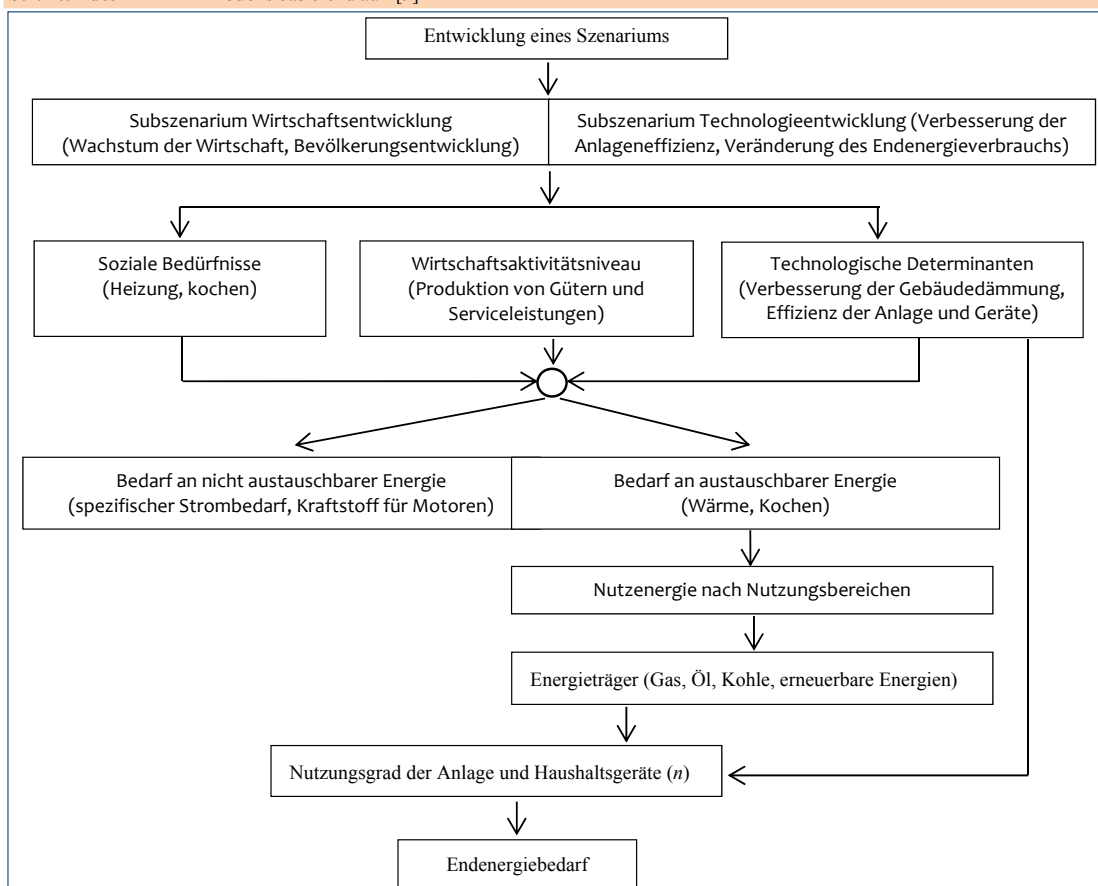
Modellansatz: statistisch

Land: Universal

Jahr: 1979 (aktualisierte Version 2006)

Kernrechner: keine

### Struktur des MAED-2-Modells basierend auf [9]



### Beschreibung des Modells

Das Modell MAED-2 (Model for Analysis of Energy Demand) kann den zukünftigen Endenergiebedarf im Wohnungssektor, im Sektor für Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD), im Verkehrssektor und im Industriesektor in einem Land prognostizieren [9]. Die Prognose simuliert Szenarien, die auf der sozialen, wirtschaftlichen, technologischen und demographischen Entwicklung eines Landes sowie auf einem mittel- und langfristigen Zeitraum basieren.

Das Modell (MAED-2) bezieht sich auf den spezifischen Endenergiebedarf für die Produktion von Waren und Dienstleistungen. Dieser Bedarf wird durch technologische, wirtschaftliche und soziale Faktoren, die im Modell berücksichtigt werden, beeinflusst. Die Energiequelle und die Höhe des Endenergiebedarfs hängen von „Bestimmungsfaktoren“, wie z.B. der Bevölkerungsentwicklung, Verkehrsmitteln, der Anzahl der Personen pro Wohnung, der Anzahl an Elektrogeräten pro Wohnung, den nationalen Prioritäten für die Entwicklung bestimmter Industrie- oder Wirtschaftssektoren, der Entwicklung der Effizienz bestimmter Arten von Geräten und der Durchdringung neuer Technologien oder Energieformen auf dem Markt, ab.

Die zukünftigen Entwicklungen dieser „Bestimmungsfaktoren“ formen zusammen Szenarien, die exogen im Modell eingegeben werden (s. Struktur des Modells). Diese Szenarien können in zwei Subszenarien unterteilt werden: Das erste steht im Zusammenhang mit dem sozio-ökonomischen System, welches die wichtigsten Merkmale der wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung beschreibt. Das Zweite bezieht sich auf die technologischen Faktoren, welche den Energiebedarf beeinflussen, wie z. B. der Nutzungsgrad und die potenzielle Marktdurchdringung der aktuellen Energiequellen.

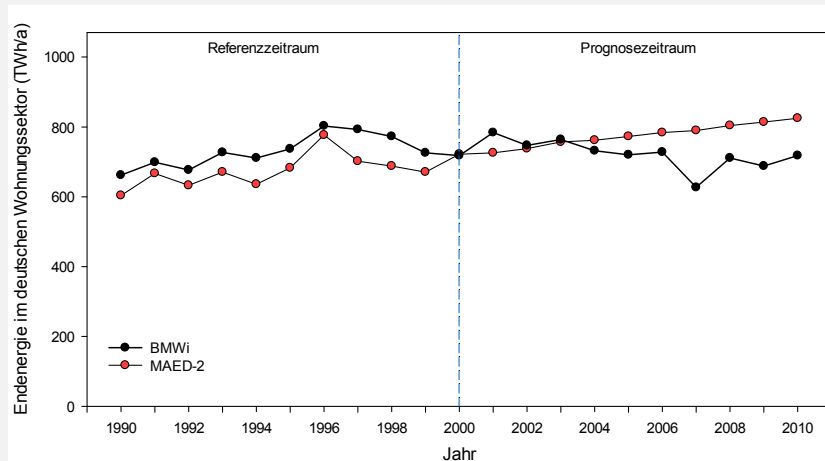
Im Wohnungssektor bezieht sich der Bestimmungsfaktor auf die demographischen Daten wie Bevölkerungsentwicklung, Anzahl der Personen pro Wohnung, die Gebäudeanzahl und -typ. Um den Endenergiebedarf im Wohnungssektor zu bestimmen, werden in MAED-2 bei den Berechnungen fünf Kategorien betrachtet: Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Raumklimatisierung und Elektrizität für Haushaltsgeräte wie z.B. Kühlschränke, Lampen, Waschmaschinen und Fernseher.

Die Berechnungen werden unter Berücksichtigung der Lebensbedingungen der Bevölkerung durchgeführt, d.h. der Wohnort (städtisch oder ländlich) und die Gebäudetypen fließen in die Berechnung mit ein. In MAED-2 können bis zu 10 verschiedene Gebäudetypen in beiden Gebieten (städtisch oder ländlich) berücksichtigt werden.

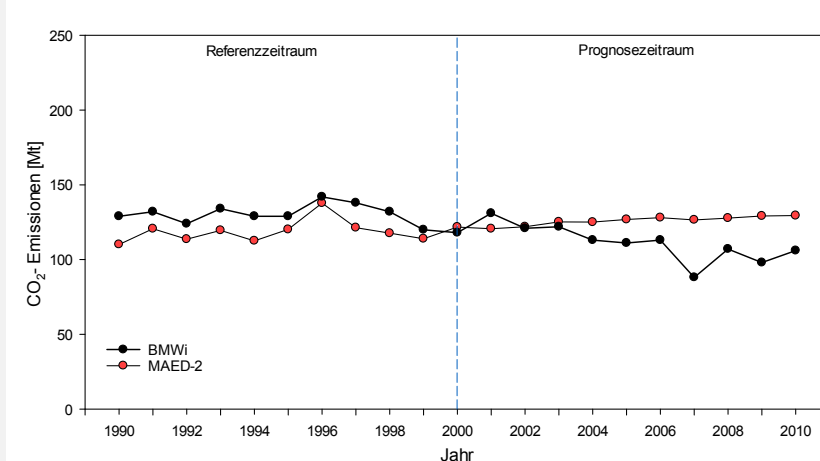
<b>Berechnungsmethoden</b>	
<p><b>Unterteilung des Wohnungsbestandes</b></p> <p>Die Anzahl der Wohnungen im jeweiligen Land ergibt sich aus der Division der Populationsgröße durch die durchschnittliche Anzahl der Bewohner pro Wohnung. Die Bevölkerungsentwicklung hängt vom Szenarium und dem Zeitraum ab. Die Projektionen der Szenarien werden auf Basis der Wachstumsraten des Referenzzeitraums entwickelt.</p> $AW_{tot}(t) = \frac{P_{t_R} \cdot \left(1 + \frac{GR}{100}\right)^{(t-t_R)}}{P_{we}} \quad \text{Gl. D-5.1}$ <p>mit:</p> <p><math>AW_{tot}(t)</math> : Gesamtanzahl der Wohnungen</p> <p><math>P_{t_R}</math> : Bevölkerungszahl im Referenzjahr <math>t_R</math></p> <p><math>P_{we}</math> : Personen pro Wohnung</p>	<p><b>Anpassungen</b></p> <p>keine</p>
<p><b>Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme (<math>EEB_{rw}</math>)</b></p> <p>In MAED-2 werden zur Bestimmung des Energiebedarfs für Raumwärme Daten von Transmissionswärmeverlusten und Gradtagzahlen benötigt, wie in Gleichung D-5.2 dargestellt ist.</p> $EEB_{rw,a,s}(t) = GB_{a,s}(t) \cdot WF_{a,s} \cdot h_{a,s} \cdot GTZ \quad \text{Gl.D-5.2}$ <p>Dabei ist:</p> <p><math>h</math> : nutzflächenspezifischer Wärmeverlust je Gebäudetyp in <math>W/(m^2K)</math></p> <p><math>GTZ</math> : Gradtagzahl in <math>Kd</math></p>	<p><b>Anpassungen</b></p> <p>keine</p>
<p><b>Bestimmung des Endenergiebedarfs für Warmwasser (<math>EEB_{ww}</math>)</b></p> <p>Zur Bestimmung des Endenergiebedarfs für Warmwasser (<math>EEB_{ww}</math>) werden die Personenanzahl pro Wohnung, der Wohnungsanteil mit Warmwasseranlagen und der jährliche spezifische Energieverbrauch für Warmwasser pro Person, Gleichung D-5.3, berücksichtigt.</p> $EEB_{ww,a,s} = GAW_{a,s} \cdot Pwe_{a,s} \cdot AWW_{a,s} \cdot EEVK_{pww,a,s} \quad \text{Gl. D-5.3}$ <p>Dabei ist:</p> <p><math>GAW_{a,s}</math> : Gesamte Anzahl der Wohnungen in Mio.</p> <p><math>AWW_{a,s}</math> : Anteil der Wohnungen mit Warmwasseranlagen in %</p> <p><math>EEVK_{pw}</math> : jährlicher spezifischer Energieverbrauch für Warmwasser</p>	<p><b>Anpassungen</b></p> <p>keine</p>
<p><b>Bestimmung des Endenergiebedarfs für Kochen (<math>EEB_{ko}</math>), Klimaanlage, Beleuchtung und Elektrogeräte (<math>EEB_{be}</math>)</b></p> <p>In MAED-2 werden bei der Berechnung des Endenergiebedarfs für Kochen, Beleuchtung und Elektrogeräte die Wohnungsanzahl und der spezifische Energieverbrauch jedes Nutzungsbereichs berücksichtigt.</p> $EEVK_n = \sum EEVK_{a,s,n} \cdot GAW_{a,s} \quad \text{Gl. D-5.4}$ <p>Darin ist:</p> <p><math>EEVK_{nb}</math> : Endenergiebedarf nach Nutzungsbereich (Kochen, Raumklimatisierung, Beleuchtung, Elektrogeräte)</p> <p><math>EEVK_{a,s,n}</math> : spezifischer Energieverbrauch pro Wohnung je Nutzungsbereich</p>	<p><b>Anpassungen</b></p> <p>keine</p>
<p><b>Zusätzliche Berechnungen</b></p> <p>Mit Hilfe von MAED-2 kann die Entwicklung der <math>CO_2</math>-Emissionen (Gleichung D-5.5) berechnet werden (in einem ähnlichen Verfahren wie bei LEAP).</p> $CO = \sum_{i=1}^n PEB_{qi} \cdot EF_{qi} \quad \text{Gl. D-5.5}$	<p><b>Anpassungen</b></p> <p>keine</p>
<p><b>Zusätzliche Anpassungen/ Annahmen zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor</b></p> <p>keine</p>	

## Ergebnisse

### Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor



### Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im deutschen Wohnungssektor



### Anmerkungen

Für die Berechnungen des Endenergiebedarfs wird im Prognosezeitraum ein Mittelwert von 3743 für die Gradtagzahl verwendet. Daher werden in diesem Zeitraum die Schwankungen im Energieverbrauch, die durch den klimatischen Einfluss entstehen, nicht erfasst.

**Sensitivitätsanalyse**

Eingangsparameter	Anfangswert	normalisierter Sensitivitätskoeffizient
Bevölkerungsentwicklung (Tsd)	82.663	2,00
Personen pro Wohnung (PE/WE)	2,34	-1,73
Gradtagzahl (Kd)	3.631	1,48
Mittelwert Wohnfläche pro Gebäudetyp (m <sup>2</sup> )		
Einfamilienhaus	130	1,18
Mehrfamilienhaus	60	0,31
spezifischer Wärmeverlust pro Gebäudetyp [Wh/(m <sup>2</sup> • k • a)]		
Einfamilienhaus	3,4	1,18
Mehrfamilienhaus	2,5	0,31
Anteil der Wohnungen, welche Heizung brauchen (%)	100	0,82
Anteil der Wohnungen nach Gebäudetyp (%)		
Einfamilienhaus (%)	59	0,74
Mehrfamilienhaus (%)	41	-0,44
Anteil der Wohnfläche, der beheizt ist (%)		
Einfamilienhaus (%)	100	0,59
Mehrfamilienhaus (%)	100	0,15
spezifischer Warmwasserverbrauch pro Person [MWh/(PE • a)]	1,03	0,24
spezifischer Elektrizitätsverbrauch [KWh/(WE • a)]	1861	0,18
Anteil der Wohnungen mit Anlage für Warmwasser (%)	100	0,12
Anteil der Wohnungen mit Elektrizität (%)	100	0,09
spezifischer Endenergieverbrauch für Kochen (MWh/WE • a)	0,84	0,08
spezifischer Endenergieverbrauch für Raumklimatisierung [KWh/(WE • a)]		
Einfamilienhaus	1109	0,001
Mehrfamilienhaus	1109	0,0004
Anteil der Wohnungen mit Klimaanlage (%)		
Einfamilienhaus	0,9	0,001
Mehrfamilienhaus	0,9	0,0004

### ECCABS Energy, Carbon and Cost Assessment for Building Stocks

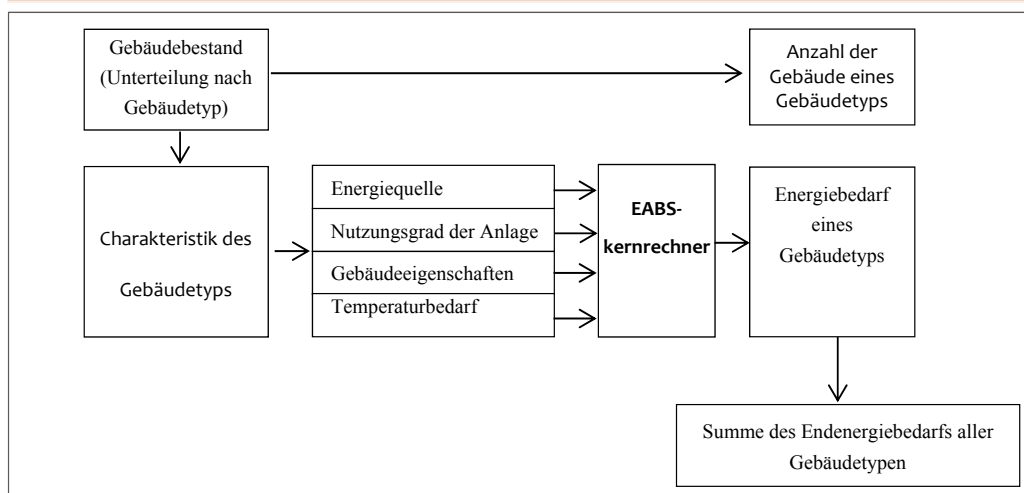
Entwickler: Chalmers University of Technology, Schweden. [22]

Modellansatz: bauphysikalisch

Land: Schweden

Jahr : 2013

Kernrechner: EABS

**Struktur des ECCABS Modells**, basierend auf Mata et al. [22]


### Beschreibung des Modells

Das ECCABS-Modell ist ein bauphysikalisches Bottom-up-Modell zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im schwedischen Wohnungssektor. Mit Hilfe dieses Modells wurde bereits der Endenergiebedarf im spanischen und deutschen Wohnungssektor ermittelt [36, 37].

Zur Bestimmung des Endenergiebedarfs wird die gesamte Anzahl der Gebäude in repräsentative Gebäudetypen unterteilt. Die Unterteilung in Gebäudetypen Anhang der Unterteilung des Gebäudebestandes bestehender Studien durchgeführt; zum Beispiel der Studie „Pla de Millora Energètica de Barcelona“ [43] für Spanien oder der Studie „Deutsche Gebäudetypologie“ [17] für Deutschland.

Nach der Unterteilung des Gebäudebestandes nach Gebäudetypen wird für jeden Gebäudetyp mit Hilfe von EABS-Kernrechner (Kernrechner des ECCABS-Modells) der Endenergiebedarf berechnet. Die Multiplikation des Endenergiebedarfs für einen einzelnen Gebäudetyp mit der Anzahl der dazugehörigen Gebäude bildet den jährlichen Endenergiebedarf für eine Gebäudekategorie. Die Summe des Endenergiebedarfs aller Wohnungskategorien bildet den Gesamtenergiebedarf im Wohnungssektor.

### Beschreibung des Kernrechners

Das EABS-Kernrechner (Energy Assessment of Building Stocks) ist ein bauphysikalisches Modell, welches den Endenergiebedarf für einzelne Gebäude bestimmen kann [21]. Das EABS-Modell wurde am Fallbeispiel eines Bürogebäudes in Spanien und eines Wohngebäudes in Schweden [21] validiert.

Mit Hilfe des EABS-Kernrechners kann der Endenergiebedarf für ein Gebäude für Raumwärme, Warmwasser, Elektrogeräte und Raumklimatisierung ermittelt werden.

Zur Quantifizierung des Endenergiebedarfs werden für eine Modellierung mit dem EABS-Kernrechner Daten der Eigenschaften des Gebäudes, zum Beispiel Wärmeverlust, Luftdichtheit, Wärmekapazität und Fläche der Bauteile (Wand, Boden, Fenster, Dach), der Heizanlage (Energiequelle, Nutzungsgrad), des Klimas (Innentemperatur, Außentemperatur, Sonnenstrahlung) und spezifische Endenergieverbrauchskennwerte für Warmwasser, Beleuchtung und Elektrogeräte benötigt. Das EABS-Modell führt eine Bestimmung des stündlichen Energiebedarfs durch. Trotzdem wird der gesamte Endenergiebedarf jährlich quantifiziert.

### Berechnungsmethoden

#### Unterteilung des Wohnungsbestandes

Die gesamte Anzahl der Gebäude wird in Gebäudetypen nach Baujahr unterteilt sowie nach Gebäudeform (z.B. EFH, MFH, GMFH) und Klimazone (Außentemperatur, Sonnenstrahlung) des jeweiligen Standortes. Die Unterteilung folgt im Wesentlichen der Klassifizierung des Gebäudebestandes von bestehenden Studien eines beliebigen Landes (s. Beschreibung des Modells).

#### Anpassungen

Anpassung der Eigenschaften und der Anzahl der Haus-Archetypen, da die Eigenschaften und die Anzahl der Haus-Archetypen ursprünglich für den schwedischen Gebäudebestand entwickelt wurden.

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme

In EABS (Kernrechner von ECCABS) wird der jährliche Endenergiebedarf für Raumwärme durch die Integration der stündlichen Temperaturdifferenz zwischen der gewünschten Raumlufttemperatur  $\theta_{r_{min}}$  und der zeitabhängigen Raumlufttemperatur  $\theta_{int}(t + \Delta t)$  berechnet (Gleichung D-6.1). In Gleichung D-6.1 wird die Reaktionsfähigkeit eines Heizsystems  $Ph$ , sowie die effektive Wärmekapazität des gesamten Gebäudes  $C$  betrachtet.

$$EEB_{rw,a,s}(t) = \frac{Ph \cdot C}{3,6 \cdot 10^6} \cdot \int_0^z (\theta_{r_{min}} - \theta_{int}(t + \Delta t)) dt \quad \text{Gl. D-6.1}$$

#### Anpassungen

Austausch der Außentemperatur zur Anpassung an die deutschen klimatischen Bedingungen.

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Warmwasser

Der Endenergiebedarf für Warmwasser wird durch die Multiplikation eines durchschnittlichen spezifischen Endenergiebedarfs für Warmwasser pro Wohnfläche und der Wohnfläche des Gebäudetyps berechnet.

$$EEB_{ww} = \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \cdot \int_0^{8760} (EEVK_{ww} \cdot WF \cdot 3600) dt \quad \text{Gl. D-6.2}$$

$EEVK_{ww}$  : durchschnittlicher spezifischer Endenergiebedarf für Warmwasser pro Wohnfläche ( $W/m^2$ )

$WF$  : Wohnfläche ( $m^2$ )

#### Anpassungen

keine

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Kochen, Beleuchtung und Elektrogeräte

Die Bestimmung des Endenergiebedarfs in diesen Bereichen wurde über den sogenannten „Elektrizitätsbedarf“ betrachtet. Die Gleichung ist dieselbe wie beim Warmwasser, aber mit dem dazugehörigen durchschnittlichen spezifischen Endenergiebedarf für Elektrizität pro Wohnfläche ( $W/m^2$ ).

#### Anpassungen

keine

#### Zusätzliche Berechnungen

Als zusätzlichen Berechnungen können mit Hilfe des ECCABS-Modells die  $CO_2$ -Emissionen ( $CO_2$ ) und Energiekosten ermittelt werden in einem ähnlichen Verfahren wie bei LEAP (Gleichung D-6.3).

$$CO_2 = \sum PEB_q \cdot EF_q \quad \text{Gl. D-6.3}$$

#### Anpassungen

keine

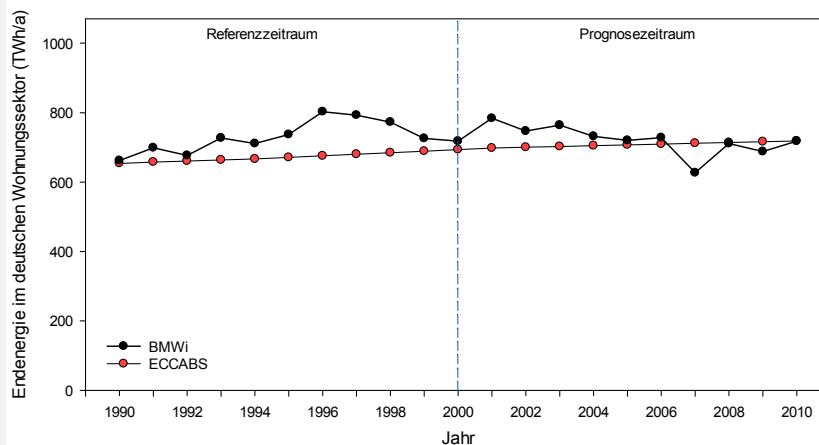
#### Zusätzliche Anpassungen/ Annahmen zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor

Eine Gleichung zur Bestimmung der zukünftigen Anzahl der Gebäude wurde von den Autoren des ECCABS-Modells nicht veröffentlicht. Daher wurde im Referenzzeitraum die tatsächliche Anzahl der Gebäude von DESTATIS [23] verwendet. Im Prognosezeitraum wurde die Gleichung von MAED-2 verwendet (Gleichung D-5.1), da MAED-2 einen ähnlichen Modellansatz hat wie ECCABS hat und außerdem eine hohe Genauigkeit bei der Bestimmung der Anzahl der Gebäude/Wohnungen aufweist.

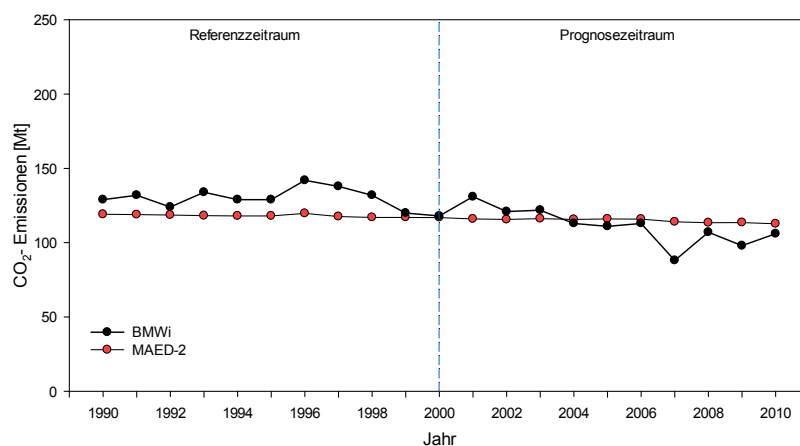


## Ergebnisse

### Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor



### Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im deutschen Wohnungssektor



## Anmerkungen

keine

**Sensitivitätsanalyse**

Eingangsparameter		Anfangswert	normalisierter Sensitivitätskoeffizient
EFH	Durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnungen (m <sup>2</sup> )	106	0,11
	Anzahl der Wohnungen (Tsd.)	10947	0,43
	Gesamte Fläche aller Bauteile (m <sup>2</sup> )	448	0,50
	Gesamte Fläche der Fensteröffnungen (m <sup>2</sup> )	30,5	-0,01
	Anteil der Fensteröffnungen, aus Glas bestehend (%)	0,7	-0,01
	Transmissionsfaktor in Abhängigkeit vom Glastype (-)	0,63	-0,01
	Schattierungsfaktor (-)	0,87	-0,01
	Spezifischer Endenergieverbrauch für Elektrogeräte (Wh/m <sup>2</sup> )	1,8	0,03
	Spezifischer Endenergieverbrauch für Beleuchtung (Wh/m <sup>2</sup> )	0,3	0,01
	spezifischer Endenergieverbrauch für Warmwasser (Wh/m <sup>2</sup> )	1,16	0,02
	Effektive Wärmekapazität des gesamten Gebäudes (J/K)	95010828	-0,16
RH	Durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnungen (m <sup>2</sup> )	101	0,04
	Anzahl der Wohnungen (Tsd.)	4452	0,11
	Gesamte Fläche aller Bauteile (m <sup>2</sup> )	247	0,11
	Gesamte Fläche der Fensteröffnungen (m <sup>2</sup> )	28,766	-0,01
	Anteil der Fensteröffnungen, aus Glas bestehend (%)	0,7	-0,02
	Transmissionsfaktor in Abhängigkeit vom Glastype (-)	0,6	-0,01
	Schattierungsfaktor (-)	0,87	-0,01
	spezifischer Endenergieverbrauch für Elektrogeräte (Wh/m <sup>2</sup> )	1,8	0,01
	spezifischer Endenergieverbrauch für Beleuchtung (Wh/m <sup>2</sup> )	0,3	0,01
	spezifischer Endenergieverbrauch für Warmwasser (Wh/m <sup>2</sup> )	1,33	0,01
	Effektive Wärmekapazität des gesamten Gebäudes (J/K)	59462211	-0,04
MFH	Durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnungen (m <sup>2</sup> )	70	0,06
	Anzahl der Wohnungen (Tsd.)	11807	0,37
	Gesamte Fläche aller Bauteile (m <sup>2</sup> )	1436	0,41
	Gesamte Fläche der Fensteröffnungen (m <sup>2</sup> )	12,7	0,004
	Anteil der Fensteröffnungen, aus Glas bestehend (%)	0,7	0,004
	Transmissionsfaktor in Abhängigkeit vom Glastype (-)	0,6	0,004
	Schattierungsfaktor (-)	0,9	0,004
	spezifischer Endenergieverbrauch für Elektrogeräte (Wh/m <sup>2</sup> )	2,3	0,02
	spezifischer Endenergieverbrauch für Beleuchtung (Wh/m <sup>2</sup> )	0,3	0,01
	spezifischer Endenergieverbrauch für Warmwasser (Wh/m <sup>2</sup> )	2,46	0,03
	Effektive Wärmekapazität des gesamten Gebäudes (J/K)	237908417	-0,11

## Anhang D. Ausführliche Beschreibung der bestehenden Modelle

Eingangsparameter		Anfangswert	normalisierter Sensitivitätskoeffizient
GMFH	Durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnung (m <sup>2</sup> )	57	0,03
	Anzahl der Wohnungen (Tsd.)	6650	0,11
	Gesamte Fläche aller Bauteile (m <sup>2</sup> )	3259	0,091
	Gesamte Fläche der Fensteröffnungen (m <sup>2</sup> )	11,682	-0,031
	Anteil der Fensteröffnungen, aus Glas bestehend (%)	0,7	-0,031
	Transmissionsfaktor in Abhängigkeit vom Glastyp (-)	0,6	-0,061
	Schattierungsfaktor (-)	0,87	0,361
	spezifischer Endenergieverbrauch für Elektrogeräte (Wh/m <sup>2</sup> )	2,6	0,01
	spezifischer Endenergieverbrauch für Beleuchtung (Wh/m <sup>2</sup> )	0,3	0,00
	spezifischer Endenergieverbrauch für Warmwasser (Wh/m <sup>2</sup> )	3,38	0,02
	Effektive Wärmekapazität des gesamten Gebäudes (J/K)	647555181	-0,03
	Luftwechselrate (1/h)	0,7	0,1
	Durchschnittliche Innentemperatur (°C)	21	1,69
Durchschnittliche Außentemperatur (°C)			
	Januar	1	-0,01
	Februar	1,9	-0,02
	März	4,7	-0,04
	April	9,2	-0,08
	Mai	14,1	-0,13
	Juni	16,7	-0,15
	Juli	19	-0,17
	August	18,6	-0,18
	September	14,3	-0,12
	Oktober	9,5	-0,08
	November	4,1	-0,04
	Dezember	0,9	-0,01

### BREHOMES Building Research Establishment's Housing Model for Energy Studies

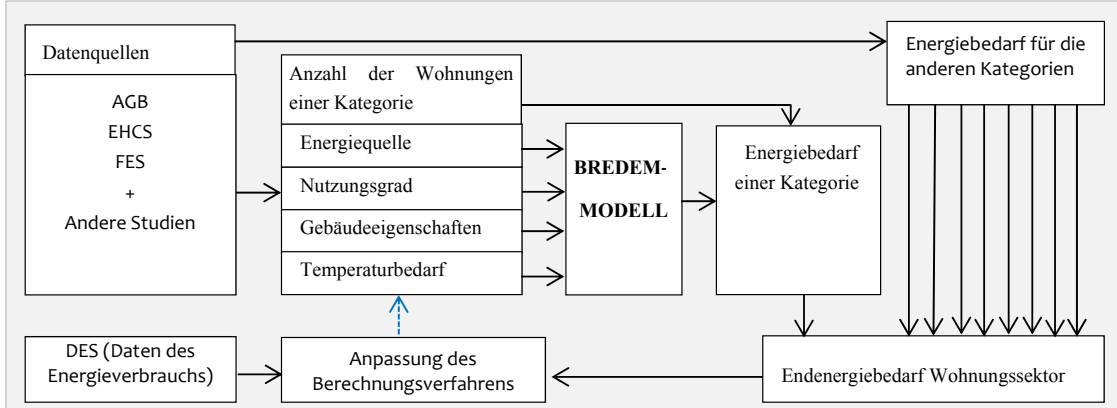
Entwickler: Building Research Establishment (BRE). [20]

Modellansatz: bauphysikalisch

Land: UK Jahr : 1990 (Aktuelle Version 1997)

Kernrechner: BREDEM

#### Struktur des BREHOMES Modells , basierend auf Shorrock und Dunster [20]



#### Beschreibung des Modells

Das BREHOMES-Modell (The Building Research Establishment's Housing Model for Energy Studies) ist ein physikalisch basiertes Bottom-up-Modell zur Bestimmung des Endenergieverbrauchs im britischen Wohnungssektor. Das Modell wurde von „The Buildings Research Establishment“ (BRE) entwickelt [28]. Dieses Modell wird als ein sehr wertvolles Werkzeug zur energiepolitischen Beratung im Vereinigten Königreich (UK) eingeschätzt, und es gibt verschiedene Institutionen (DOE's Environmental and Energy Management Directorate, DOE's Building Regulations Division, the Department of Trade and Industry, the Energy Saving Trust, the Statistical Office of the European Communities and the International Energy Agency), welche die Daten von BREHOMES verwenden [20]. Zur Berechnung des Endenergiebedarfs im britischen Wohnungssektor unterteilt das BREHOMES-Modell die gesamte Menge der britischen Wohnungen in 1000 Kategorien. Die Berechnung des Endenergiebedarfs jeder Wohnungskategorie wird mit Hilfe des BREDEM- Modells (aktuell Version 12) ausgeführt. Die Summe des berechneten Endenergiebedarfs wird mit dem tatsächlichen Endenergieverbrauch verglichen. Der tatsächliche Endenergieverbrauch wird aus dem Digest of United Kingdom Energy Statistics (DES) entnommen. Falls es Unterschiede zwischen dem berechneten und tatsächlichen Endenergieverbrauch gibt, wird in BREDEM der Temperaturbedarf der Wohnungskategorie geändert und es wird eine neue Simulation durchgeführt, um die Simulationsergebnisse anzupassen. Sobald die Ergebnisse des Modells für alle Wohnungskategorien für ein bestimmtes Jahr kalibriert wurden, wird mit BREHOMES eine Prognose des Endenergiebedarfs durchgeführt.

#### Beschreibung des Kernrechners

Der BREDEM-Kernrechner liefert monatlichen Schätzungen zum Endenergiebedarf für Raumwärme, Warmwasser, Kochen, Beleuchtung und Elektrogeräte in der Wohnung. Damit wird die monatliche Schwankung des jährlichen Endenergieverbrauchs (im Wesentlichen Raumwärme) berücksichtigt. Zur Quantifizierung des Endenergiebedarfs benötigt BREDEM Daten zu verschiedenen Eigenschaften des Gebäudes (Wandfläche, Bodenfläche, Fensterfläche zusammen mit ihren zugehörigen U-Werten), der Heizanlage (Quelle, Nutzungsgrad), des Klimas (Innentemperatur, Außentemperatur, Sonnenstrahlung) und Sonstiges, wie z. B. die Aufenthaltsdauer von Personen in der Wohnung oder die Anzahl der Bewohner.

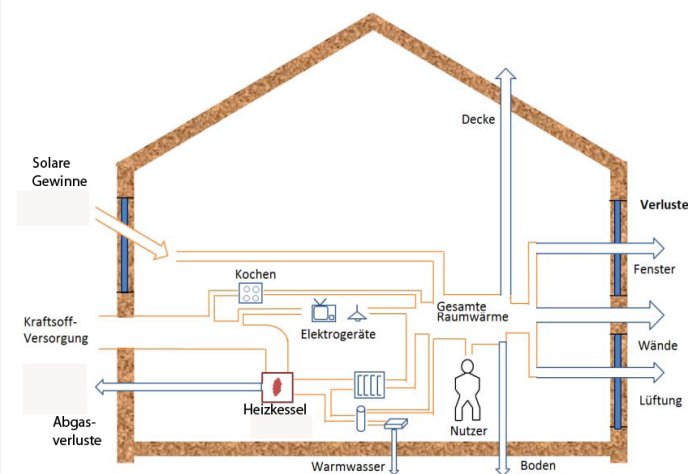
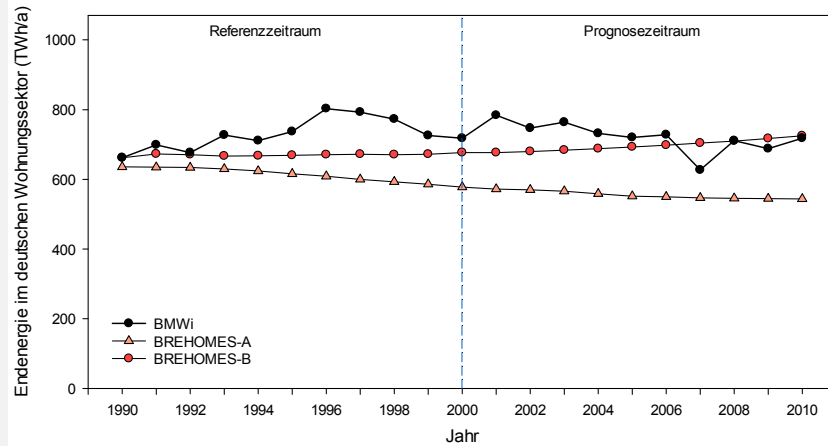


Abbildung D-7.1 Struktur des BREDEM-Kernrechners

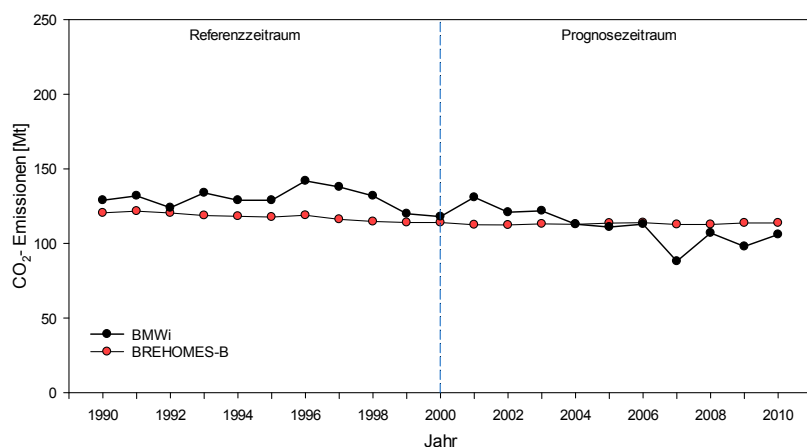
<b>Berechnungsmethoden</b>	
<p><b>Unterteilung des Wohnungsbestandes</b></p> <p>In BREHOMES wird die Anzahl der Wohnungen auf Basis von Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung und der durchschnittlichen Anzahl der Bewohner pro Wohnung (Gleichung D-7.1) berechnet.</p> $AW_{tot}(t) = \frac{P(t) \cdot AW_{tot,t_R}}{\sum_{i=1}^n N_i \cdot AW_{t_R,S}} \quad \text{Gl. D-7.1}$ <p>WF : Wohnfläche  <math>N_i</math> : Anzahl der Nutzer nach Haus-Archetyp  <math>P(t)</math> : Bevölkerungszahl im Jahr t  <math>AW_{tot,t_R}</math> : Anzahl der Wohnungen im Bezugsjahr t  <math>AW_{t_R,S}</math> : Anzahl der Wohnungen im Referenzjahr <math>t_R</math></p>	<p><b>Anpassungen</b></p> <p>Das Verhältnis zwischen der Anzahl der Personen und der Wohnfläche wurde an den deutschen Wohnungssektor angepasst. Außerdem wurden die Eigenschaften und die Anzahl der Haus-Archetypen der deutsche Gebäudetypologie des IWU entnommen.</p>
<p><b>Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme</b></p> <p>Die Berechnung des Endenergiebedarfs für Raumwärme wird in zwei Teilen durchgeführt. Der erste Schritt ist die Bestimmung des Endenergiebedarfs <math>Q_{h1}</math> in einer beheizten Zone, der zweite Schritt die Bestimmung des Endenergiebedarfs <math>Q_{h2}</math> in einer unbeheizten Zone. Die Summe beider Energiebedarfe wird als Gesamtendenergiebedarf für Raumwärme betrachtet. <math>Q_{h1}</math> und <math>Q_{h2}</math> wird mit Hilfe folgender Gleichung berechnet (Gleichung D-7.2 und D-7.3). Der Energiebedarf für Raumwärme hängt von folgenden Faktoren ab: monatliche Gradtagzahl bezogen auf den Innentemperaturbedarf in der beheizten oder unbeheizten Zone <math>DD\{T_{bi}\}</math>, Transmissionswärmeverlust in beheizten <math>H_1</math> und unbeheizten Zonen <math>H_2</math> und Transmissionswärmeverlust zwischen beiden Zonen <math>H_3</math>.</p> $Q_{h1} = 8,64 \cdot 10^{-5} (H_1 + H_2 \cdot H_D) DD\{T_{b1}\} \quad \text{Gl. D-7.2}$ $Q_{h2} = 8,64 \cdot 10^{-5} \left( \frac{H_2^2}{H_2 + H_3} \right) DD\{T_{b2}\} \quad \text{Gl. D-7.3}$	<p><b>Anpassungen</b></p> <p>keine</p>
<p><b>Bestimmung des Endenergiebedarfs für Warmwasser</b></p> <p>In der Berechnung mit BREDEM werden der Warmwasserbedarf <math>\Phi_u</math>, die Wärmeverluste in der Wasserverteilung <math>\Phi_{pp}</math> und dem Warmwasserspeicher <math>\Phi_t</math>, die Warmwasserversorgung durch Solarenergie <math>\Phi_s</math> und der Nutzungsgrad der Heizanlage <math>\Phi_d</math> als Eingangsparameter für den jährlichen Endenergiebedarf für Warmwasser betrachtet (Gleichung D-7.4).</p> $EEB_{ww} = \{\Phi_u + \Phi_{pp} + \Phi_t + \Phi_d - \Phi_s\} / (31,71 \cdot \epsilon_w) \quad \text{Gl. D-7.4}$ <p><math>\epsilon_w</math> : Nutzungsgrad der Heizanlage multipliziert mit dem Faktor 31,71, um von der Einheit Watt zu GJ/Jahr zu wechseln</p>	<p><b>Anpassungen</b></p> <p>keine</p>
<p><b>Bestimmung des Endenergiebedarfs für Kochen</b></p> <p>Der Endenergiebedarf für Kochen <math>EEB_{ko}</math> hängt im Wesentlichen von den verwendeten Kochsystemen und der Anzahl der Nutzer (N) ab.</p> $EEB_{ko} = 1,7 + 0,34 \cdot N \quad \text{Elektroherd} \quad \text{Gl. D-7.5}$ $EEB_{ko} = 2,98 + 0,6 \cdot N \quad \text{Gasherd} \quad \text{Gl. D-7.6}$ $EEB_{ko} = 3,91 + 0,85 \cdot N \quad \text{Küchenherd mit verschiedenen Brennstoffen: Holz, Holzbriketts, Braunkohlebriketts} \quad \text{Gl. D-7.7}$	<p><b>Anpassungen</b></p> <p>keine</p>
<p><b>Bestimmung des Endenergiebedarfs für Beleuchtung und Elektrogeräte</b></p> <p>Im Bereich Beleuchtung und Elektrogeräte wird der Elektrizitätsenergiebedarf <math>E_{LA}</math> auf Basis der Anzahl der Nutzer N und der Wohnfläche WF bestimmt.</p> $E_{LA} = 4,47 + 0,0232 \cdot TFA \cdot N \quad \text{für } WF \cdot N < 710 \quad \text{Gl. D-7.8}$ $E_{LA} = 11,98 + 0,015 \cdot TFA \cdot N - 2,8 \cdot 10^{-6} \cdot (WF \cdot N)^2 \quad \text{für } 710 \leq WF \cdot N < 2400 \quad \text{Gl. D-7.9}$ $E_{LA} = 31,01 \quad \text{für } 2400 \leq WF \cdot N \quad \text{Gl. D-7.10}$	<p><b>Anpassungen</b></p> <p>keine</p>
<p><b>Zusätzliche Berechnungen</b></p> <p>Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen (Gleichung D-7.11)</p> $CO_2 = \sum PEB_q \cdot EF_q \quad \text{Gl. D-7.11}$	<p><b>Anpassungen</b></p> <p>Daten der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren wurden an die verwendeten deutschen Energiequellen angepasst (Anhang C-12)</p>
<p><b>Zusätzliche Anpassungen/ Annahmen zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor</b></p> <p>Keine</p>	

## Ergebnisse

### Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor



### Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im deutschen Wohnungssektor



## Anmerkungen

Die Ergebnisse von BREHOMES-A berücksichtigen die ursprünglichen BREDEM Algorithmen für die Bestimmung der Anzahl der Wohnungen und BREHOMES-B berücksichtigt Anpassungen der ursprünglichen Algorithmen für das Verhältnis zwischen der Anzahl der Personen und der Wohnfläche.

**Sensitivitätsanalyse**

Eingangsparameter	Anfangswert	normalisierter Sensitivitätskoeffizient
Wohnfläche pro Einwohner (m <sup>2</sup> /N)	39,50	2.02
Bevölkerungsentwicklung (Tsd)	82.663	2.00
Innentemperatur (°C)	21	1.99
Nutzungsgrad der Heizungssysteme (%)	77.5	-1.17
Heizperiode am Wochenende (h)	16	0.75
Außentemperatur (°C)	9.5	-0.72
Luftwechselrate (1/h)	0.7	0.63
Heizperiode in der Woche (h)	9	0.57
U-Wert Außenwand (W/ m <sup>2</sup> K)	1.7	0.44
Nutzungsgrad der Kessel (%)	71	-0.44
Fläche Außenwand (m <sup>2</sup> )	74.5	0.43
Geschosshöhe (m)	2.5	0.38
Durchschnitt der Wohnfläche pro Wohnung (m <sup>2</sup> )	91	0.31
Fläche Boden (m <sup>2</sup> )	60	0.25
U-Wert Boden (W/m <sup>2</sup> K)	1.2	0.25
Strahlungsintensität in (W/m <sup>2</sup> )	72.2	-0.14
Transmissionsgrad in Abhängigkeit vom Glastype (-)	0.8	-0.12
Verschattungsfaktor für Verglasung (-)	0.7	-0.11
Glasflächenanteil der Fenster (%)	0.7	-0.11
U-Wert Fenster (W/ m <sup>2</sup> K)	1.33	0.08
Nutzung von energiesparenden Leuchtmitteln (%)	16	-0.08
Fläche Dach (m <sup>2</sup> )	60	0.05
U-Wert Dach (W/ °C m <sup>2</sup> )	0.24	0.05
Gesamte Fläche der Fensteröffnung ( m <sup>2</sup> )	18.1	-0.03
Volumen Warmwasserspeicher (l)	193	0.02
Stärke der Dämmung des Warmwasserspeicher (mm)	100	-0.02
U-Wert Tür (W/m <sup>2</sup> K)	2	0.01
Anteil der Leuchten mit Energiesparlampen (%)	16	0.005

### CDEM Community Domestic Energy Model

Entwickler: Loughborough University, UK. [28]

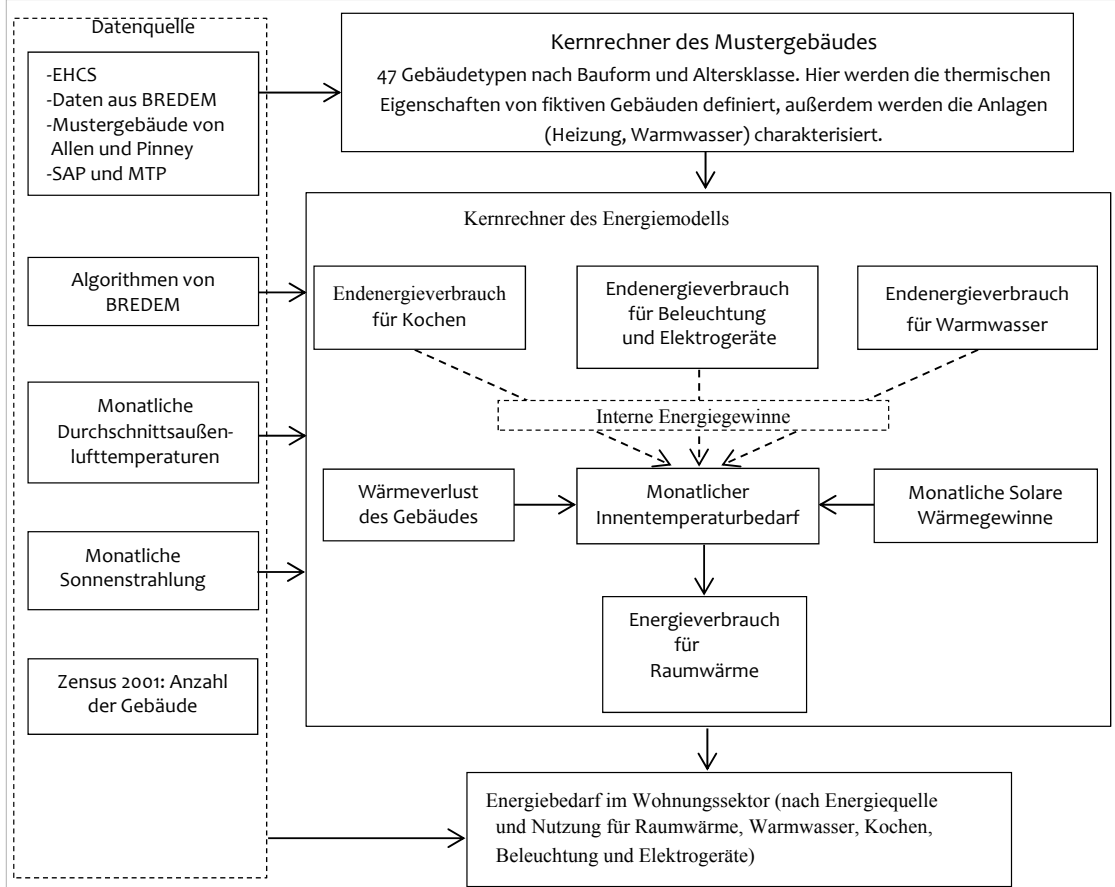
Modellansatz: bauphysikalisch

Land: UK

Jahr : 2010

Kernrechner: BREDEM

### Struktur des CDEM Modells, basierend auf Kavgić et al. [28]



### Beschreibung des Modells

Das CDEM-Modell (The Community Domestic Energy Model) ist ein bauphysikalisches Modell zur Bestimmung des Endenergiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen im britischen Wohnungssektor. Das Modell wurde von „Loughborough University“ im Jahr 2010 entwickelt [28].

Zur Berechnung des Endenergiebedarfs im britischen Wohnungssektor unterteilt das CDEM-Modell die gesamte Menge des britischen Wohnbestandes in 47 Haus-Archetypen. Die Berechnung des Endenergiebedarfs jedes Haus-Archetyps wird mit Hilfe des BREDEM-Modells ausgeführt.

Zur Berechnung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor mit dem CDEM-Modell wurden die gleichen Datenquellen verwendet wie mit BREHOMES. Weiterhin ist der Kernrechner von CDEM der gleiche wie bei BREHOMES. Aus diesem Grund wurden die gleichen Ergebnisse erwartet. Auf Grund der folgenden Kriterien wurde jedoch eine Berechnung des Energiebedarfs durchgeführt:

- das CDEM-Modell ist das erste Modell mit einer Sensitivitätsanalyse, was den Vergleich zwischen den Ergebnissen von Kavgić et al. 2010 [28] und den Ergebnissen dieser Arbeit erlaubt.
- mit Hilfe des CDEM-Modells können die CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnet werden.
- das CDEM-Modell benötigt weniger Haus-Archetypen (47) als BREHOMES (1000). Dies erlaubt zu überprüfen ob eine detaillierte Unterteilung der gesamten Menge der Wohnungen genauere Ergebnisse liefert.
- zur Prognose des zukünftigen Energiebedarfs wird mit BREHOMES ein einzelner zusammengesetzter Wohnungstyp angenommen, welcher die ganze Vielfalt der Wohnungstypen in einer Berechnung vereint, mit CDEM wird jedoch der zukünftige Energiebedarf für einen jeden Haus-Archetypen einzeln berechnet.



### Berechnungsmethoden

#### Unterteilung des Wohnungsbestandes

Für die gesamte Anzahl der Gebäude im Fallbeispiel Deutschland wurde dasselbe Berechnungsverfahren wie bei BREHOMES (s. Gleichung D-8.1) verwendet. Allerdings wird die Unterteilung des Wohnbestandes mit 16 Haus-Archetypen durchgeführt, um einen möglichen Unterschied bei den Ergebnissen in Bezug auf die Anzahl der repräsentativen Haus-Archetypen zu überprüfen.

$$AW_{\text{tot}}(t) = \frac{P(t) \cdot AW_{\text{tot},t_R}}{\sum_{i=1}^Z N_i \cdot AW_{t_R,s}} \quad \text{Gl.D-8.1}$$

WF : Wohnfläche  
 $N_i$  : Anzahl der Nutzer nach Haus-Archetyp  
 $P(t)$  : Bevölkerungszahl im Jahr  $t$   
 $AW_{\text{tot},t_R}$  : Anzahl der Wohnungen im Referenzjahr  $t_R$   
 $AW_{t_R,s}$  : Anzahl der Wohnungen im Referenzjahr  $t_R$

#### Anpassungen

Die 32 Haus-Archetypen des IWU wurden auf 16 Haus-Archetypen reduziert. Hierbei wurde die Reduktion nach Baualtersklasse entsprechend der Änderungen der Wärmeschutzverordnung (vor 1977, 1977-1983, 1984-1994) durchgeführt.

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme

Identisches Berechnungsverfahren wie bei BREHOMES (s. Gleichung D-8.2 und D-8.3)

$$Q_{h1} = 8,64 \cdot 10^{-5} (H_1 + H_2 \cdot H_D) DD\{T_{b1}\} \quad \text{Gl. D-8.2}$$

$$Q_{h2} = 8,64 \cdot 10^{-5} \left( \frac{H_2^2}{H_2 + H_3} \right) DD\{T_{b2}\} \quad \text{Gl. D-8.3}$$

#### Anpassungen

keine

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Warmwasser

Identisches Berechnungsverfahren wie bei BREHOMES (s. Gleichung D-8.4).

$$EEB_{ww} = \{\Phi_u + \Phi_{pp} + \Phi_t + \Phi_a - \Phi_s\} / (31,71 \cdot \varepsilon_w) \quad \text{Gl. D-8.4}$$

#### Anpassungen

keine

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Kochen

Identisches Berechnungsverfahren wie bei BREHOMES (s. folgende Gleichungen).

$$EEB_{ko} = 1,7 + 0,34 \cdot N \quad \text{Elektroherd} \quad \text{Gl. D-8.5}$$

$$EEB_{ko} = 2,98 + 0,6 \cdot N \quad \text{Gasherd} \quad \text{Gl. D-8.6}$$

$$EEB_{ko} = 3,91 + 0,85 \cdot N \quad \text{Küchenherd mit verschiedenen Brennstoffen: Holz, Holzbriketts, Braunkohlebriketts} \quad \text{Gl. D-8.7}$$

#### Anpassungen

keine

#### Bestimmung des Endenergiebedarfs für Beleuchtung und Elektrogeräte

Identisches Berechnungsverfahren wie bei BREHOMES (s. folgende Gleichungen).

$$E_{LA} = 4,47 + 0,0232 \cdot TFA \cdot N \quad \text{für } WF \cdot N < 710 \quad \text{Gl. D-8.8}$$

$$E_{LA} = 11,98 + 0,015 \cdot TFA \cdot N - 2,8 \cdot 10^{-6} \cdot (WF \cdot N)^2 \quad 710 \leq WF \cdot N < 2400 \quad \text{Gl. D-8.9}$$

$$E_{LA} = 31,01 \quad \text{für } 2400 \leq WF \cdot N \quad \text{Gl. D-8.10}$$

#### Anpassungen

keine

#### Zusätzliche Berechnungen

Mit Hilfe des CDEM-Modells können die CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnet werden.

Das Berechnungsverfahren ist wie bei BREHOMES (s. Gleichung D-8.11).

$$CO_2 = \sum PEB_q \cdot EF_q \quad \text{Gl. D-8.11}$$

#### Anpassungen

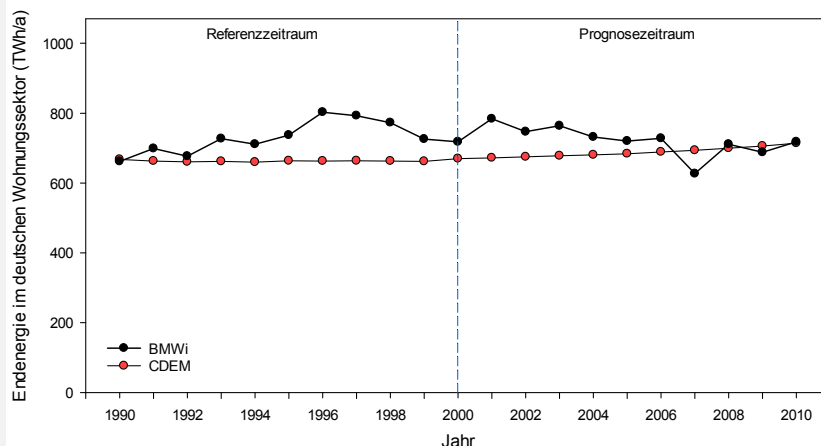
Daten der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren wurden an die verwendeten deutschen Energiequellen angepasst (Anhang C-12)

#### Zusätzliche Anpassungen/ Annahmen zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnssektor

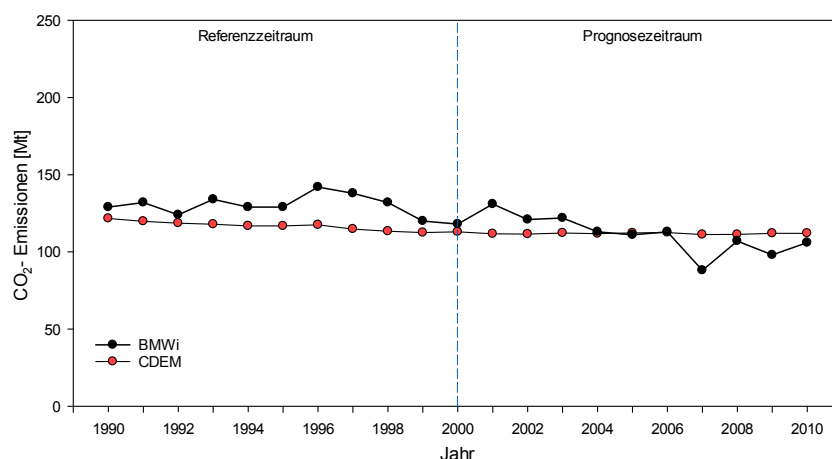
Keine

## Ergebnisse

### Entwicklung des Endenergiebedarfs im deutschen Wohnungssektor

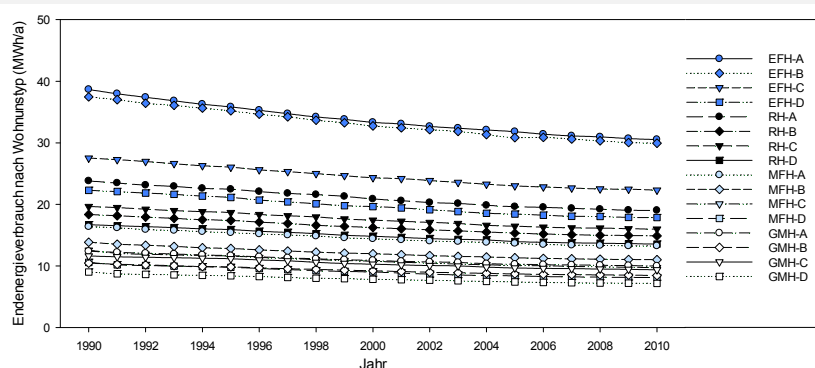


### Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im deutschen Wohnungssektor



## Anmerkungen

Für die Bestimmung des zukünftigen Endenergiebedarfs wird eine Berechnung für jeden „Haus-Archetyp“ durchgeführt. Aus diesem Grund gibt es die Möglichkeit, in CDEM die im Laufe der Zeit auftretenden Änderungen des Endenergiebedarfs für jeden Haus-Archetyp zu bestimmen (s. folgende Abbildung).



**Sensitivitätsanalyse**

Eingangsparameter	Anfangswert	normalisierter Sensitivitätskoeffizient
Anzahl der Wohnungen (Tsd)	33.856	2.00
Innentemperatur (°C)	21	1.88
Emissionsfaktor Strom (g/MWh)	0.61	0.89
Außentemperatur (°C)	9.5	-0.72
Emissionsfaktor Heizöl (g/MWh)	0.26	0.64
Luftwechselrate (h <sup>-1</sup> )	0.7	0.63
Anteil der Energie aus Strom (%)	22	0.58
Heizperiode in der Woche (h)	9	0.56
Emissionsfaktor Erdgas (g/MWh)	0.2	0.54
U-Wert Außenwand (W/ m <sup>2</sup> K)	1.7	0.44
Fläche Außenwand (m <sup>2</sup> )	74.5	0.43
Nutzungsgrad der Heizungssysteme (%)	77.5	-0.56
Nutzungsgrad der Warmwasser (%)	71	-0.42
Geschosshöhe (m)	2.5	0.39
Durchschnitt der Wohnfläche pro Wohnung (m <sup>2</sup> )	91	0.31
Fläche Boden (m <sup>2</sup> )	60	0.25
U-Wert Boden (W/m <sup>2</sup> K)	1.2	0.25
Anteil der Energie aus Erdgas (%)	33.6	-0.19
Strahlungintensität in (W/m <sup>2</sup> )	72.2	-0.14
Transmissionsgrad in Abhängigkeit vom Glastype (-)	0.8	-0.12
Verschattungsfaktor für Verglasung (-)	0.7	-0.12
Glasflächenanteil der Fenster (%)	0.7	-0.12
Anteil erneuerbarer Energien (%)	5.1	-0.11
U-Wert Fenster (W/m <sup>2</sup> K)	1.33	0.09
Emissionsfaktor Fernwärme (g/MWh)	0.21	0.08
Emissionsfaktor Kohle (g/MWh)	0.21	0.05
Fläche Dach (m <sup>2</sup> )	60	0.05
U-Wert Dach (W/m <sup>2</sup> K)	0.24	0.05
Anteil der Energie aus Öl (%)	32.5	-0.03
Gesamte Fläche der Fensteröffnung (m <sup>2</sup> )	18.1	-0.03
Stärke der Dämmung des Speichers (mm)	100	-0.03
U-Wert Tür (W/m <sup>2</sup> K)	2	0.02
Volumen Warmwasserspeicher (l)	193	0.02
Anteil der Energie aus Fernwärme (%)	4.8	-0.02
Anteil der Energie aus Kohle (%)	1.8	0.01
Fläche Tür (m <sup>2</sup> )	2	0.01
Anteil der Leuchten mit Energiesparlampen (%)	16	-0.01

### CREEM Canadian Residential Energy End-use Model

Entwickler: Dalhousie University. [18]

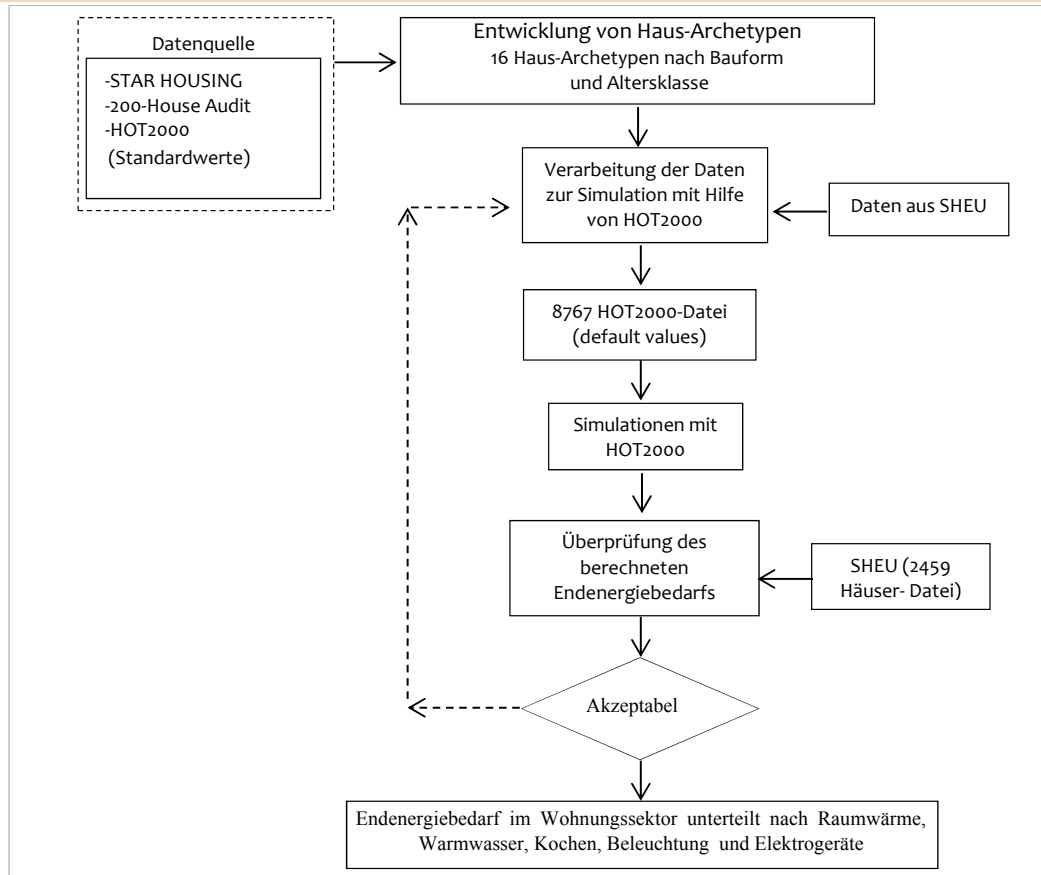
Modellansatz: bauphysikalisch

Land: Kanada

Jahr: 1998

Kernrechner: HOT2000

### Struktur des CREEM Modells basierend auf Farahbakhsh et al. [18]



### Beschreibung des Modells

Das CREEM-Modell (Canadian Residential Energy End-Use Model) ist ein bauphysikalisches Modell zur Bestimmung des Endenergiebedarfs und der Energiekosten im kanadischen Wohnungssektor. Zur Berechnung des Endenergiebedarfs im kanadischen Wohnungssektor unterteilt das CREEM-Modell die gesamte Menge der kanadischen Gebäude in 16 Mustergebäude (Haus-Archetypen).

CREEM verwendet zur Entwicklung von Mustergebäuden verschiedene Datenquellen, wie z.B. Daten zum jährlichen Energieverbrauch der Gebäude des „Survey of Household Energy Use Statistics (SHEU)“, „2000-House Audit“, „STAR-HOUSING (Statically Representative HOUSING)“, „Standardwerte von HOT2000 und Daten zur Anzahl der Gebäude aus Statistic of Canada (Statcan)“ [33].

Die Berechnung des Endenergiebedarfs jedes Mustergebäudes /aller Mustergebäude (Haus-Archetypen) wird mit Hilfe von HOT2000 (aktuell Version v10.51) ausgeführt. HOT2000 ist eine vereinfachte bauphysikalische Software, die den Endenergiebedarf für einzelne Gebäude bestimmen kann. Die Software wurde für „CanmetENERGY“, „Natural Resources Canada“ entwickelt [40]. Zur Quantifizierung des Endenergiebedarfs benötigt HOT2000 Daten zu den Eigenschaften des Gebäudes (Wandfläche, Bodenfläche, Fensterfläche, zusammen mit ihren zugehörigen U-Werten) und des Klimas (durch Auswahl einer kanadischen Provinz). Nach der Eingabe der Eingangsparameter in HOT2000 wird die gesamte Endenergie für jedes einzelne Mustergebäude berechnet. Dann multipliziert das CREEM-Modell diese Ergebnisse (Endenergiebedarf für ein einzelnes Gebäude) mit der Anzahl der dazugehörigen Mustergebäude. Somit erhält man den jährlichen Endenergiebedarf für einen Haus-Archetyp. Danach addiert CREEM den Endenergiebedarf aller Haus-Archetypen, um den Gesamtenergiebedarf im Wohnungssektor zu bestimmen. Da die Berechnungsverfahren und Algorithmen der Kernrechner des CREEM-Modells (HOT2000) nicht frei zugänglich sind, ist eine detaillierte Erklärung des Modells nicht möglich.

### REEPS Residential End-Use Energy Planning System

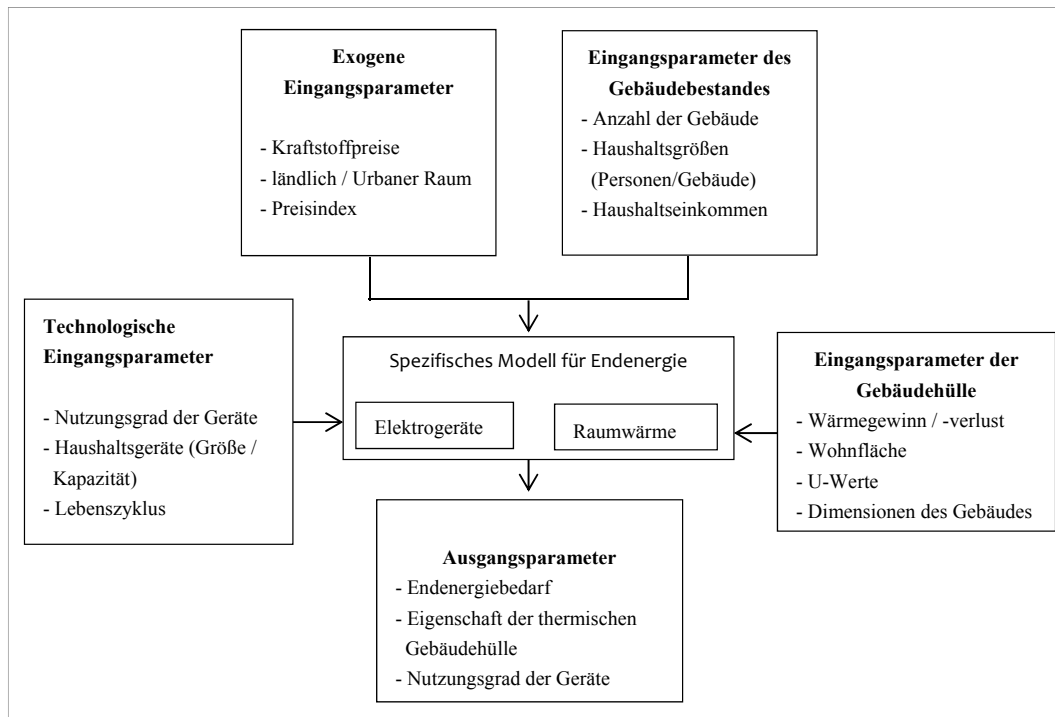
Entwickler: Electric Power Research Institute. [1-3]

Modellansatz: bauphysikalisch

Land: USA

Jahr : 1994

Kernrechner: DOE-2

**Struktur des REEPS - Modells**, basierend auf Koomey et al. [3]


### Beschreibung des Modells

Das Residential End-Use Energy Planning System (REEPS) wurde vom Electric Power Research Institute (EPRI) entwickelt. Mit Hilfe dieses Modells kann die zukünftige Entwicklung des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor bestimmt werden. Das REEPS-Modell wird zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im Wohnungssektor in den Vereinigten Staaten von Amerika verwendet. Die erste Version des Modells (REEPS 1.0) wurde verwendet, um den Endenergiebedarf für eine bestimmte Stichprobe von Gebäuden zu bestimmen [29]. Die aktuellste Version des Modells (REEPS 2.1) enthält Daten des US-amerikanischen Wohnungsbestandes (z.B. Schätzungen zur Anzahl der Geräte in einem Haus-Archetyp, zum Nutzungsgrad der Anlagen/Geräte, zum durchschnittlichen Endenergieverbrauch für Elektrogeräte), welche eine Modellierung des gesamten Wohnungssektors in den Vereinigten Staaten ermöglichen [1].

Zur Bestimmung des gesamten Endenergiebedarfs mit REEPS wird der gesamte Gebäudebestand in Haus-Archetypen unterteilt. Diese Unterteilung des US-amerikanischen Gebäudebestandes erfolgt in kleine und große Einfamilienhäuser sowie Mehrfamilienhäuser, welche zusätzlich nach den zwei Klimaregionen (Nord und Süd) unterschieden werden.

Die Bestimmung des Endenergiebedarfs für jeden Haus-Archetypen wird getrennt nach Elektrogeräten und Raumwärme durchgeführt. Dafür hat REEPS zwei Module zur Berechnung des Endenergiebedarfs: ein Modul zur Bestimmung des Endenergiebedarfs für Elektrogeräte und ein anderes Modul zur Berechnung des Endenergiebedarfs für Raumwärme. Der Endenergiebedarf für Elektrogeräte wird mit Hilfe von spezifischen Endenergieverbrauchskennwerten berechnet, welche in Abhängigkeit von Nutzungsgrad, Größe und Lebenszyklus der Elektrogeräte bestimmt werden. Die Berechnung des Endenergiebedarfs für Raumwärme wird mit dem Computer-Programm DOE-2.2 bestimmt. DOE-2.2 wurde vom Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) entwickelt [49]. Das Programm kann den stündlichen Endenergiebedarf in einem Gebäude und gleichzeitig die Energiekosten bestimmen. Da die Berechnungsverfahren und Algorithmen der Kernrechner des Computer-Programms DOE-2.2 nicht frei zugänglich sind, ist eine detaillierte Erklärung des Modells nicht möglich.

### DECM Domestic Energy and Carbon Model

Entwickler: The Martin Centre for Architectural and Urban Studies. [24]

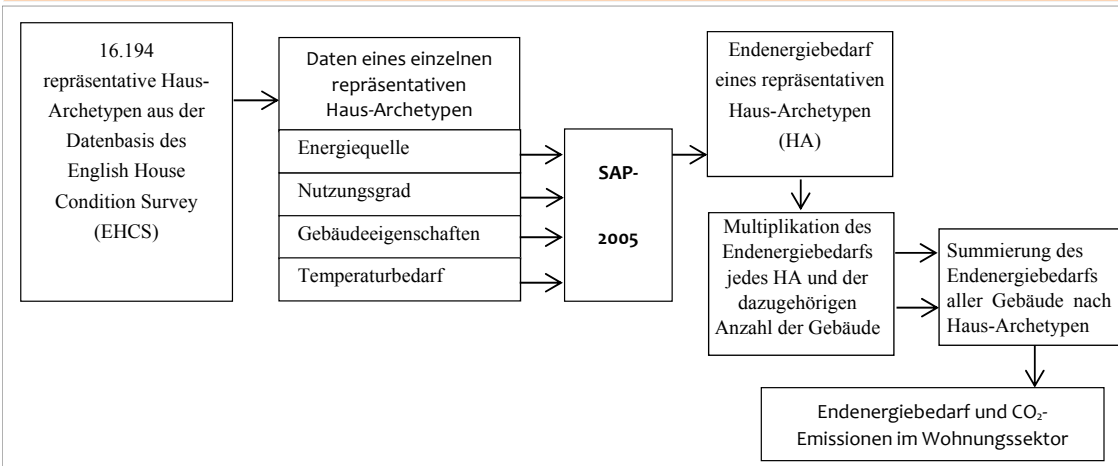
Modellansatz: bauphysikalisch

Land: England

Jahr : 2011

Kernrechner: SAP-2005

#### Struktur des DECM Modells, basierend auf Cheng und Steemers [24]



#### Beschreibung des Modells

Das DECM-Modell (Domestic Energy and Carbon Model) ist ein bauphysikalisches Bottom-up-Modell zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im englischen Wohnungssektor. Das Modell wurde von „The Martin Centre for Architectural and Urban Studies, Department of Architecture, University of Cambridge“ entwickelt.

Das DECM-Modell hat zwei wichtige Module. Ein Modul für Charakterisierung des Gebäudebestandes durch repräsentativen Haus-Archetypen und ein anderes Modul zur Bestimmung des Endenergiebedarfs jedes Haus-Archetypen. Zur Charakterisierung des englischen Gebäudebestandes werden Daten aus dem English Housing Survey 2007 (EHS) [30] verwendet und die Bestimmung des Endenergiebedarfs für einen Haus-Archetyp wird mit Hilfe des Kernrechners SAP-2005 (Standard Assessment Procedure) durchgeführt. Das English Housing Survey ist eine jährliche Umfrage in welcher Daten der Wohnbedingungen (Personen pro Wohnung, Einkommen, Eigentum, Alter und Tätigkeit der Bewohner) und Wohngebäude (u.a. Anzahl der Gebäude und Wohnungen, Gebäudetyp, Nutzungsgrad der Anlagen, Endenergieverbrauch) gesammelt werden. SAP-2005 ist eine Vereinfachung des BREDEM-Kernrechners [24].

Die Autoren des DECM-Modells haben zwei wichtige Änderungen in SAP-2005 übernommen. Zuerst wurde als Innentemperatur 21°C festgelegt. Hiergegen wurde von Cheng and Steemers [24] angenommen, dass alle Haus-Archetypen 19°C als Innentemperatur haben werden. Zweitens wurden in SAP-2005 dieselben Heizungsregelungen wie in BREDEM verwendet. Cheng und Steemers hatten hingegen vier verschiedenen Heizungsregelungen in Relation zur Tätigkeit der Bewohner (s. Abbildung D-11.1). Eine Validierung des DECM-Modells wurde im Jahr 2011 durchgeführt [24]. Hierbei wurde der durch das DECM-Modell berechnete Endenergiebedarf mit dem vom Department of Energy & Climate Change (DECC) ermittelten Endenergieverbrauch für Gas- und Elektrizität Endenergieverbrauch verglichen. Der Unterschied zwischen dem berechneten Endenergiebedarf und dem statistisch ermittelten Endenergieverbrauch war niedriger als 4%. Außerdem haben Cheng and Steemers [24] im Jahr 2011 eine Sensitivitätsanalyse für das DECM-Modell durchgeführt. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die einflussreichsten Parameter die Innentemperatur ( $S_{ij} = 1,55$ ), die Außentemperatur ( $S_{ij} = -0,58$ ), der Nutzungsgrad der Heizanlage ( $S_{ij} = -0,45$ ), und die Wohnfläche ( $S_{ij} = -0,34$ ) sind.

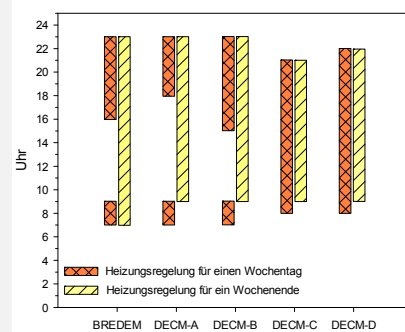


Abbildung D-11.1: Vergleich zwischen Heizungsregelung von BREDEM und DECM. DECM -A ist für Bewohner, die eine Vollzeitarbeit haben. DECM-B ist für Bewohner, die eine Teilzeitarbeit haben. DECM-C ist für Bewohner, die Rentner sind. DECM -D ist für Bewohner, die arbeitslos sind. Quelle: [24,38]

**CHM** Cambridge Housing Model

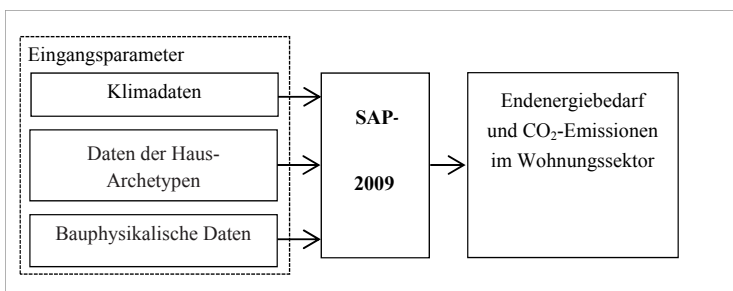
Entwickler: Cambridge Architectural Research Ltd. [19]

Land: UK

Jahr : 2010

Modellansatz: bauphysikalisch

Kernrechner: SAP-2009

**Struktur des DECM Modells**, basierend auf Hughes et al.[26]**Beschreibung des Modells**

Das Cambridge Housing Model (CHM) ist ein bauphysikalisches Modell zur Bestimmung des Endenergiebedarfs im britischen Wohnungssektor. Das CHM-Modell wurde von „Cambridge Architectural Research (CAR)“ für das „Department of Energy and Climate Change (DECC)“ entwickelt. DECC verwendet dieses Modell zur Entwicklung von Energieeinsparmaßnahmen im britischen Wohnungssektor.

Als Eingangsparameter des Modells werden klimatische Daten (Außentemperatur, Sonnenstrahlung) und bauphysikalische Daten (Nutzungsgrad der Anlagen bzw. Wirkungsgrade der Haushaltgeräte) sowie 16.150 Haus-Archetypen verwendet. Die Daten der Haus-Archetypen stammen aus dem English Housing Survey (EHS) [32]. Hierbei ist anzumerken, dass im Unterschied zum DECM-Modell, das CHM-Modell Daten der EHS vom Jahr 2009 verwendet und zusätzlich dazu eine aktualisierte Version des SAP-Kernrechners (SAP-2009).

Mit Hilfe von SAP-2009 wird die Bestimmung des Endenergiebedarfs eines jeden der 16.150 Haus-Archetypen durchgeführt. Hierbei muss erklärt werden, dass für SAP-2009 als Innentemperatur 21°C festgelegt wurde. Im CHM-Modell dagegen wird angenommen, dass alle Haus-Archetypen 19°C als Innentemperatur haben werden. Jeder dieser Haus-Archetypen repräsentiert hierbei eine bestimmte Anzahl an Wohnungen, die insgesamt die 22,8 Mio. Wohnungen in England im Jahr 2011 repräsentieren [42]. Auf diese Weise kann der gesamte Endenergiebedarf im britischen Wohnungssektor durch Multiplikation des Endenergiebedarfs pro Haus-Archetyp und der dazugehörigen Anzahl der Gebäude ermittelt werden.

Eine Validierung des CHM-Modells wurde im Jahr 2013 durchgeführt [47]. Hierbei wurde der durch das CHM-Modell berechnete Endenergiebedarf mit dem vom Department of Energy & Climate Change (DECC) ermittelten tatsächlichen Endenergieverbrauch verglichen. Nach einer Kalibrierung des CHM-Modells war der Unterschied zwischen dem berechneten Endenergiebedarf und dem tatsächlichen Endenergieverbrauch niedriger als 5%. Außerdem haben Hughes et al. [26] im Jahr 2013 eine Sensitivitätsanalyse für das CHM-Modell durchgeführt. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die einflussreichsten Parameter auf das CHM-Modell die Innentemperatur ( $S_{ij}=1,54$ ), der Nutzungsgrad der Heizanlage ( $S_{ij}=-0,66$ ) und die Außentemperatur ( $S_{ij}=-0,59$ ) sind. Zusätzlich dazu haben Hughes et al. [26] bestimmt, dass die Ergebnisse des Endenergiebedarfs im britischen Wohnungssektor aufgrund der Unsicherheiten der Eingangsparameter zwischen -18% und +43% bezüglich des modellierten Mittelwerts des Endenergiebedarfs schwanken können.